



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL RÍO GUACALATE A SU PASO POR LA  
COMUNIDAD DE PASTORES, SACATEPÉQUEZ**

**Ester Lucía Barrios Rivas**

Asesorado por el MSc. Ing. Carlos Enrique Barrios Chávez

Guatemala, enero de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL RÍO GUACALATE A SU PASO POR LA  
COMUNIDAD DE PASTORES, SACATEPÉQUEZ**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ESTER LUCÍA BARRIOS RIVAS**

ASESORADO POR EL MSc. ING. CARLOS ENRIQUE BARRIOS CHÁVEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA CIVIL**

GUATEMALA, ENERO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
EXAMINADOR	Ing. Mario Estuardo Arriola Ávila
EXAMINADOR	Ing. Marco Antonio García Díaz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL RÍO GUACALATE A SU PASO POR LA COMUNIDAD DE PASTORES, SACATEPÉQUEZ**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 30 de mayo de 2018.

**Ester Lucía Barrios Rivas**

Guatemala, 05 de noviembre de 2020

Ingeniero  
Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Jefe del Departamento de Hidráulica  
Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Aguilar:

Por medio de la presente tengo el gusto de presentarle el trabajo de tesis de graduación titulado **“CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL RÍO GUACALATE A SU PASO POR LA COMUNIDAD DE PASTORES, SACATEPÉQUEZ”**, de la estudiante Ester Lucía Barrios Rivas, Carnet No. 201403561, para el cual fui nombrado asesor.

Al mencionado trabajo se le ha dado el seguimiento correspondiente revisándolo y corrigiéndolo hasta conseguir el resultado presentado, con la seguridad de que podrá llenar los fines propuestos de un buen trabajo de tesis.

Sin más por el momento y esperando que el presente trabajo llene los requisitos establecidos, se despide de usted.

Atentamente,

  
MSc. Ing. Carlos Enrique Barrios Chávez  
Colegiado No. 3610  
Asesor

**CARLOS ENRIQUE BARRIOS CHAVEZ**  
**INGENIERO CIVIL**  
**MAESTRIA EN INGENIERIA SANITARIA**  
**COLEGIADO No. 3610**



ESCUELA DE  
**INGENIERÍA CIVIL**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Guatemala, 27 de Enero de 2021  
EIC-AH-001-2021/paap

Ingeniero  
Armando Fuentes Roca  
Director Escuela Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos

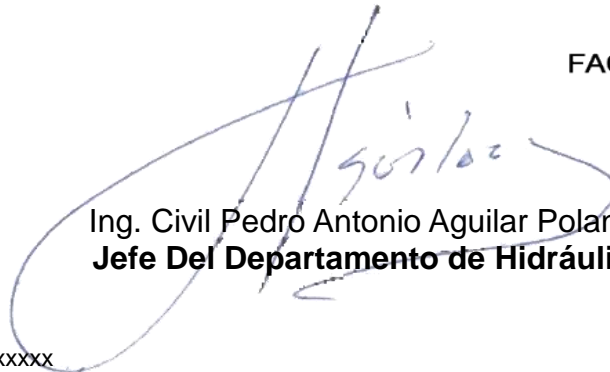
Ingeniero Fuentes:

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL RÍO GUACALATE A SU PASO POR LA COMUNIDAD DE PASTORES, SACATEPÉQUEZ**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil **ESTER LUCÍA BARRIOS RIVAS**, quien contó con la asesoría del Ingeniero **CARLOS ENRIQUE BARRIOS CHÁVEZ**.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la Ingeniería nacional y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Civil Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Jefe Del Departamento de Hidráulica

FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO  
DE  
HIDRAULICA  
U S A C

Cc: Estudiante xxxxxxxxxx  
Archivo

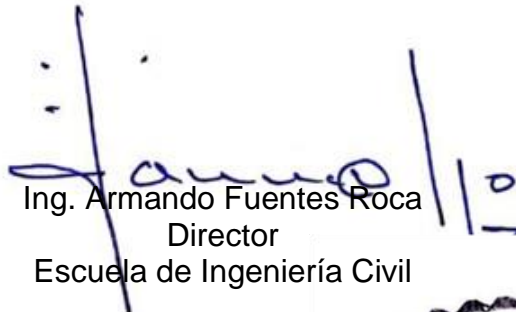




LNG.DIRECTOR.004.EIC.2022

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y la aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL RÍO GUACALATE A SU PASO POR LA COMUNIDAD DE PASTORES, SACATEPÉQUEZ**, presentado por: **Ester Lucía Barrios Rivas**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

  
Ing. Armando Fuentes Roca  
Director  
Escuela de Ingeniería Civil

Guatemala, enero de 2022



Facultad de Ingeniería

Decanato  
24189101-  
24189102  
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.031.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL RÍO GUACALATE A SU PASO POR LA COMUNIDAD DE PASTORES, SACATEPÉQUEZ**, presentado por: **Ester Lucía Barrios Rivas**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana



Guatemala, enero de 2022

AACE/gaoc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Por cambiar mi vida por completo y enseñarme a proseguir a la meta para recibir el premio celestial al cual nos llama por medio de Cristo Jesús.

### **Mis padres**

Carlos Enrique y Ruth Nohemi. Por el gran amor que me han dado y por hacer tantos sacrificios por mi bienestar. Son mis ejemplos para ser una buena profesional.

### **Mis hermanos**

Pablo Enrique y Ana Ruth. Por ayudarme siempre que estaba en problemas, enseñarme a ser una buena estudiante y por todos los buenos momentos que hemos pasado.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por acompañarme durante toda la carrera y mostrarme su amor cada día.
<b>Mis padres</b>	Por apoyarme a lo largo de estos años y enseñarme la importancia de la educación.
<b>Mis hermanos</b>	Por brindarme ayuda y consejos siempre que lo necesitaba.
<b>Ing. Mario Corzo</b>	Por haberme dado la oportunidad de hacer prácticas en su sección y ser un apoyo en todo momento.
<b>Ing. Ronald Galindo (q.e.p.d.)</b>	Por haberme dado la oportunidad de ser su auxiliar, brindándome su amistad y confianza.
<b>Ing. Fulgencio Garavito</b>	Por proporcionarme toda la información para realizar este trabajo de graduación.
<b>Ing. Jéser Nij</b>	Por guiarme y asesorarme para poder terminar este trabajo de graduación.
<b>Mis amigos</b>	Por siempre creer en mí, por animarme en toda ocasión y por todos los buenos momentos que hemos vivido.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XIII
RESUMEN .....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1.    ÁREA DE ESTUDIO.....	1
1.1.    Características generales .....	2
1.1.1.    Lecturas de niveles máximos históricos .....	5
1.2.    Caracterización climática.....	6
1.2.1.    Temperatura media mensual .....	7
1.2.2.    Brillo solar mensual .....	9
1.2.3.    Humedad relativa media mensual .....	11
1.2.4.    Precipitación media mensual .....	13
1.3.    Balance hídrico.....	14
1.3.1.    Evapotranspiración potencial utilizando el método de Hargreaves .....	15
1.3.2.    Evapotranspiración potencial utilizando el método de Blaney – Criddle .....	19
1.3.3.    Balance hídrico comparación.....	21
1.4.    Zonas de vida Holdridge.....	23
1.4.1.    Bosque húmedo montano bajo subtropical (bh- MB) .....	24

1.4.2.	Bosque muy húmedo montano bajo subtropical (bmh-MB) .....	25
2.	CONCEPTOS GENERALES DE HIDRÁULICA FLUVIAL .....	27
2.1.	Generalidades de las corrientes naturales .....	28
2.1.1.	Etapas de la corriente de agua.....	30
2.1.1.1.	Etapa de formación o niñez.....	30
2.1.1.2.	Etapa de juventud (ríos de montaña) ...	31
2.1.1.3.	Etapa de madurez (ríos de pidemonte) .....	32
2.1.1.4.	Etapa de vejez (ríos de llanura).....	33
2.1.2.	El curso de los ríos.....	34
2.1.3.	La rugosidad de un río .....	34
2.1.4.	Las avenidas .....	35
2.1.5.	Régimen de un río.....	36
2.1.5.1.	Cauces en régimen torrencial o de montaña .....	37
2.1.5.2.	Cauces en régimen tranquilo o de llanura.....	37
2.1.6.	Morfología fluvial .....	37
2.1.6.1.	Propiedades morfológicas .....	39
2.1.6.1.1.	Thalweg.....	39
2.1.6.1.2.	Sinuosidad .....	40
2.1.6.1.3.	Barras .....	41
2.1.6.2.	Perfil longitudinal del río .....	42
2.1.6.3.	Sección transversal del río .....	43
2.1.7.	Clasificación de los ríos.....	43
2.2.	Transporte de sedimentos en ríos.....	44
2.3.	Control de inundaciones.....	48

3.	CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA Y MODELACIÓN	
	HIDRÁULICA.....	51
3.1.	Parámetros geomorfológicos de la cuenca.....	52
3.2.	Método del número de curva (CN) .....	53
3.3.	Tiempo de concentración .....	70
3.4.	Método del bloque alterno .....	72
3.5.	Modelo hidrológico .....	75
3.6.	Modelo hidráulico .....	79
	3.6.1. Zonas de inundación .....	86
	3.6.1.1. Historial de inundaciones.....	90
	CONCLUSIONES .....	93
	RECOMENDACIONES.....	95
	BIBLIOGRAFÍA.....	97
	APÉNDICES .....	99
	ANEXOS.....	101



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Recorrido del río Guacalate .....	1
2.	Poblados cercanos al punto de control .....	2
3.	Ubicación de la cuenca del río Guacalate .....	3
4.	Ubicación de la estación hidrométrica.....	4
5.	Ubicación de la estación meteorológica .....	7
6.	Gráfica de temperatura media.....	9
7.	Gráfica de brillo solar .....	10
8.	Gráfica de humedad relativa media mensual .....	12
9.	Climograma de la estación Alameda ICTA.....	14
10.	Radiación extraterrestre ( $R_E$ ) expresada en equivalente de evaporación (mm/día) .....	17
11.	Duración máxima diaria media de las horas de fuente de insolación (N) en diferentes meses y latitudes.....	18
12.	Porcentaje de horas en la ecuación de Blaney – Criddle .....	20
13.	Balance hídrico climático.....	22
14.	Comparación de los métodos en relación a los datos de evapotranspiración .....	22
15.	Zonas de vida Holdridge dentro de la cuenca.....	24
16.	Componentes del sistema fluvial.....	28
17.	Representación de las etapas de un río en zonas tropicales .....	30
18.	Sección transversal típica de un río de montaña .....	32
19.	Sección transversal de un río de piedemonte .....	33
20.	Sección transversal típica de un río de llanura.....	33

21.	Tipos de cauce.....	38
22.	Formas del cauce .....	38
23.	Posición del thalweg, barras, rápidos y pozos .....	40
24.	Sinuosidad de los ríos.....	40
25.	Perfil longitudinal de un río .....	42
26.	Variación de pendientes durante la erosión.....	46
27.	Balanza de Lane .....	47
28.	Identificación de las subcuencas del río Guacalate .....	51
29.	Variables en el método de abstracciones de precipitación del SCS .....	54
30.	Usos del suelo en la cuenca del río Guacalate .....	55
31.	Tipos de suelo en la cuenca del río Guacalate .....	56
32.	Diagrama triangular para determinación de la textura en materiales tipo suelo .....	58
33.	Modelo hidrológico de la cuenca Guacalate en HEC-HMS.....	76
34.	Hidrograma de crecida para un $T_r = 10$ años.....	77
35.	Hidrograma de crecida para un $T_r = 50$ años.....	77
36.	Hidrograma de crecida para un $T_r = 100$ años.....	78
37.	Hidrograma de crecida para un $T_r = 200$ años.....	78
38.	Superficie del cauce a partir de un modelo digital del terreno. ....	80
39.	Geometría del cauce previa a su exportación a HEC-RAS.....	80
40.	Modelo hidráulico del río a su paso por la comunidad de Pastores en HEC-RAS.....	81
41.	Coeficientes de rugosidad de Manning.....	83
42.	Valores de Manning “n”.....	84
43.	Zona de inundación para un periodo de retorno de 10 años .....	85
44.	Zonas de inundación para los diferentes periodos de retorno obtenidas en HEC-RAS .....	86
45.	Comparación de áreas de inundación cerca de la comunidad de Pastores.....	87



46.	Área de inundación para un periodo de retorno de 10 años .....	88
47.	Área de inundación para un periodo de retorno de 50 años .....	88
48.	Área de inundación para periodo de retorno de 10 años .....	89
49.	Área de inundación para un periodo de retorno de 200 años .....	89
50.	Inundaciones en Pastores .....	90

## TABLAS

I.	Lecturas de niveles máximos históricos .....	5
II.	Datos de temperatura media .....	8
III.	Datos de brillo solar.....	10
IV.	Humedad relativa media mensual .....	11
V.	Datos para el climograma .....	13
VI.	Variables climáticas para el método de Hargreaves .....	16
VII.	Valores de radiación solar extraterrestre.....	16
VIII.	Valores de horas de luz máximas posibles .....	16
IX.	Evapotranspiración por el método de Hargreaves .....	18
X.	Variables climáticas para el método de Blaney – Criddle.....	19
XI.	Porcentaje de horas de luz del total anual .....	19
XII.	Evapotranspiración por el método de Blaney – Criddle.....	20
XIII.	Balance hídrico por medio del método de Hargreaves.....	21
XIV.	Balance hídrico por medio del método de Blaney – Criddle.....	21
XV.	Factores para analizar ríos.....	29
XVI.	Clasificación general de las corrientes de agua .....	43
XVII.	Parámetros geomorfológicos de cada subcuenca .....	52
XVIII.	Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana.....	59
XIX.	Número de curva de la subcuenca uno.....	60
XX.	Número de curva de la subcuenca dos.....	60

XXI.	Número de curva de la subcuenca tres .....	61
XXII.	Número de curva de la subcuenca cuatro .....	61
XXIII.	Número de curva de la subcuenca cinco .....	61
XXIV.	Número de curva de la subcuenca seis .....	62
XXV.	Número de curva de la subcuenca siete .....	62
XXVI.	Número de curva de la subcuenca ocho.....	62
XXVII.	Número de curva de la subcuenca nueve.....	63
XXVIII.	Número de curva de la subcuenca once.....	63
XXIX.	Número de curva de la subcuenca doce.....	63
XXX.	Número de curva de la subcuenca trece .....	64
XXXI.	Número de curva de la subcuenca catorce.....	64
XXXII.	Número de curva de la subcuenca quince.....	64
XXXIII.	Número de curva de la subcuenca dieciséis.....	65
XXXIV.	Número de curva de la subcuenca diecisiete .....	65
XXXV.	Número de curva de la subcuenca dieciocho .....	65
XXXVI.	Número de curva de la subcuenca diecinueve .....	66
XXXVII.	Número de curva de la subcuenca veinte.....	66
XXXVIII.	Número de curva de la subcuenca veintiuno .....	66
XXXIX.	Número de curva de la subcuenca veintidós .....	67
XL.	Número de curva de la subcuenca veintitrés .....	67
XLI.	Número de curva de la subcuenca veinticuatro .....	67
XLII.	Número de curva de la subcuenca veintiséis.....	68
XLIII.	Resumen de áreas permeables e impermeables .....	68
XLIV.	Parámetros de ecuaciones .....	70
XLV.	Parámetros para HEC-HMS .....	71
XLVI.	Precipitación para un periodo de retorno de 10 años .....	73
XLVII.	Precipitación para un periodo de retorno de 50 años .....	74
XLVIII.	Precipitación para un periodo de retorno de 100 años .....	74
XLIX.	Precipitación para un periodo de retorno de 200 años .....	75

L.	Resultados obtenidos en la modelación hidrológica .....	79
LI.	Coeficientes de rugosidad de Manning “n” en diferentes secciones a lo largo del río .....	81
LII.	Áreas de cada zona de inundación .....	85



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>F<sub>a</sub></b>	Abstracción continuada
<b>I<sub>a</sub></b>	Abstracción inicial
<b>Q</b>	Caudal
<b>n</b>	Coefficiente de rugosidad de Manning
<b>D</b>	Duración
<b>ETP</b>	Evapotranspiración potencial
<b>cn'</b>	Factor de retardancia
<b>°C</b>	Grados centígrados
<b>ha</b>	Hectáreas
<b>N</b>	Horas luz máximas posibles
<b>n</b>	Insolación
<b>I</b>	Intensidad
<b>km<sup>2</sup></b>	Kilómetros cuadrados
<b>L<sub>c</sub></b>	Longitud del cauce
<b>mm</b>	Milímetro
<b>CN</b>	Número de curva
<b>CN<sub>p</sub></b>	Número de curva anterior
<b>CN<sub>c</sub></b>	Número de curva compuesto
<b>CN<sub>II</sub></b>	Número de curva para condiciones de humedad normales
<b>CN<sub>III</sub></b>	Número de curva para condiciones de saturación completas
<b>NF</b>	Número de Froude

<b>S<sub>med</sub></b>	Pendiente media
<b>Y</b>	Pendiente media del terreno
<b>T<sub>r</sub></b>	Periodo de retorno
<b>%</b>	Porcentaje
<b>p</b>	Porcentaje de horas de luz del total anual
<b>P</b>	Precipitación
<b>P<sub>e</sub></b>	Precipitación efectiva
<b>R<sub>E</sub></b>	Radiación extraterrestre
<b>S</b>	Retención potencial máxima
<b>SCS</b>	Soil Conservation Service
<b>T</b>	Temperatura media

## GLOSARIO

<b>Avenida</b>	Rápido aumento del nivel de agua que desciende por un curso fluvial.
<b>Barras</b>	Depósitos de sedimentos junto a la orilla o dentro del río.
<b>Cauce</b>	Canal natural por el cual transcurre el río.
<b>Cuenca</b>	Porción de territorio en la que la precipitación incidente pasa a formar parte del río principal a través de escorrentía superficial.
<b>Evapotranspiración</b>	Combinación de dos procesos: la pérdida de agua de la superficie del suelo ocasionada por la evaporación y la liberación de agua a la atmósfera debido a la transpiración de la vegetación.
<b>Hidrograma</b>	Gráfico que muestra el valor del caudal en función del tiempo.
<b>Hietograma</b>	Gráfico que muestra el valor de precipitación en función de tiempo.





## RESUMEN

Actualmente las comunidades carecen de la información suficiente sobre el comportamiento de los ríos que recorren por la región, por lo que se ignora la magnitud de los efectos negativos que pueden ocasionar estos debido a los cambios bruscos que presentan producto de las lluvias. En la comunidad de Pastores se han reportado problemas de inundación y daños a las obras civiles a lo largo de los años debido al desborde del río Guacalate.

Por estos motivos, en el presente trabajo se describe el proceso para realizar una modelación hidrológica y una modelación hidráulica del río hasta un punto de control cercano a la comunidad de interés, seleccionando los métodos adecuados que se adapten a la información disponible que se registran en las estaciones cercanas.

Realizando la modelación del comportamiento del río, se puede obtener un resultado representativo que ayuda a tener una mejor aproximación y visualización de las zonas de amenaza por crecida que se pueden presentar en la comunidad de Pastores.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Analizar las características hidráulicas del río Guacalate a su paso por la comunidad de Pastores, Sacatepéquez.

### **Específicos**

1. Generar el modelo hidrológico de la cuenca del río Guacalate hasta la comunidad de Pastores, Sacatepéquez, a partir de la información disponible que se registren en las estaciones cercanas.
2. Escoger los modelos de abstracciones y de transformación que mejor se acoplen a la información recabada para poder realizar la modelación de lluvias de diferentes periodos de retorno.
3. Establecer las zonas de amenaza por crecidas para la comunidad de Pastores obtenidas a través de la modelación hidráulica.



## INTRODUCCIÓN

Un río es un elemento natural, que, a diferencia de una obra civil, no tiene parámetros que son previamente definidos, ya que cada río tiene sus propias características dependiendo de su ubicación. Para poder aprovechar de manera adecuada este recurso, es necesario conocerlo. Por lo tanto, los ríos deben ser visualizados tanto como aportadores de beneficios, como de riesgos.

Debido al crecimiento poblacional, muchas de las comunidades de Guatemala se han establecido en zonas cercanas a las riberas de los ríos. Esto ha provocado que aumenten los daños ocasionados por las crecidas y crezca el peligro de pérdidas humanas. Las constantes inundaciones que se reportan en la época lluviosa del país, hacen cada vez más necesario realizar estudios que permitan generar información sobre las zonas de amenaza para que con base a esa investigación, se puedan encontrar soluciones que minimicen los efectos.

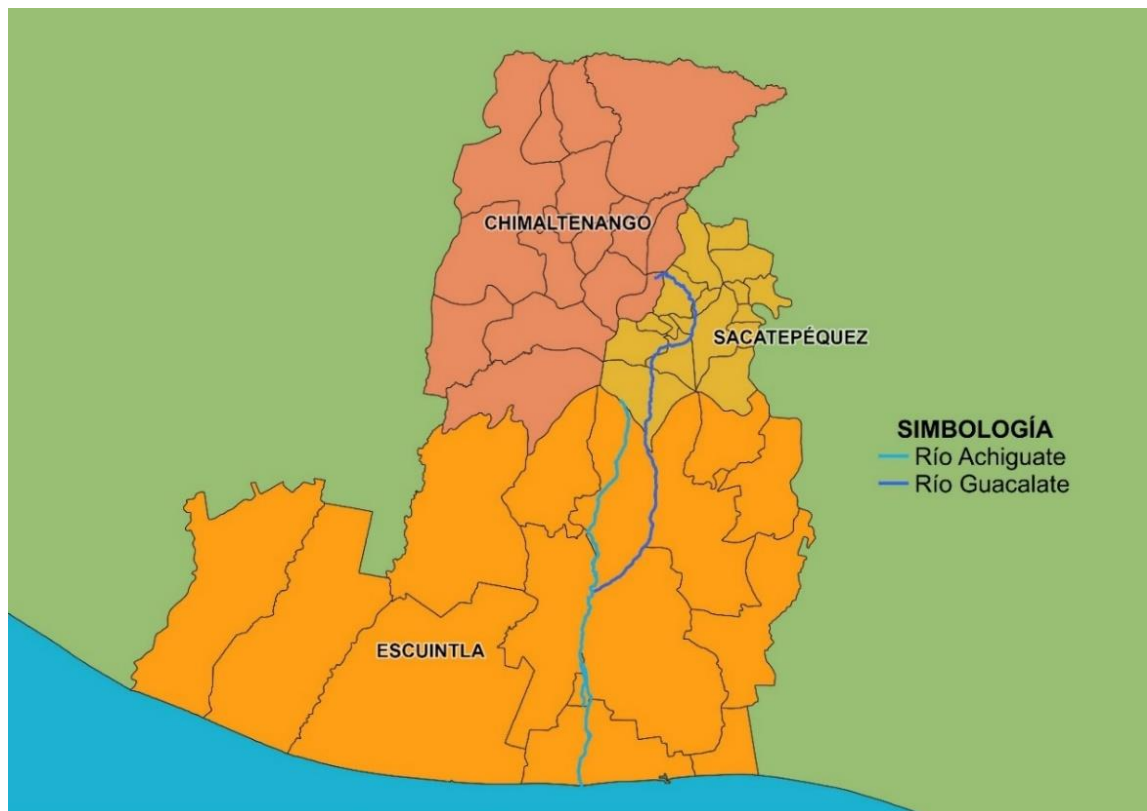
A consecuencia de la problemática expuesta, en el siguiente trabajo se hace una investigación para determinar las zonas de inundación que genera el río Guacalate a su paso por la comunidad de Pastores, del departamento de Sacatepéquez. Para ello, se recaba toda la información disponible de las estaciones más cercanas al sitio de interés con la finalidad de encontrar la metodología que mejor se adapte y así, poder generar modelos representativos que ayuden a prevenir más daños.



## 1. ÁREA DE ESTUDIO

El río Guacalate nace en el departamento de Chimaltenango y a lo largo de su recorrido, atraviesa el departamento de Sacatepéquez para finalmente unirse al río Achiguate en el departamento de Escuintla. El río forma parte de la vertiente del Pacífico.<sup>1</sup>

Figura 1. **Recorrido del río Guacalate**

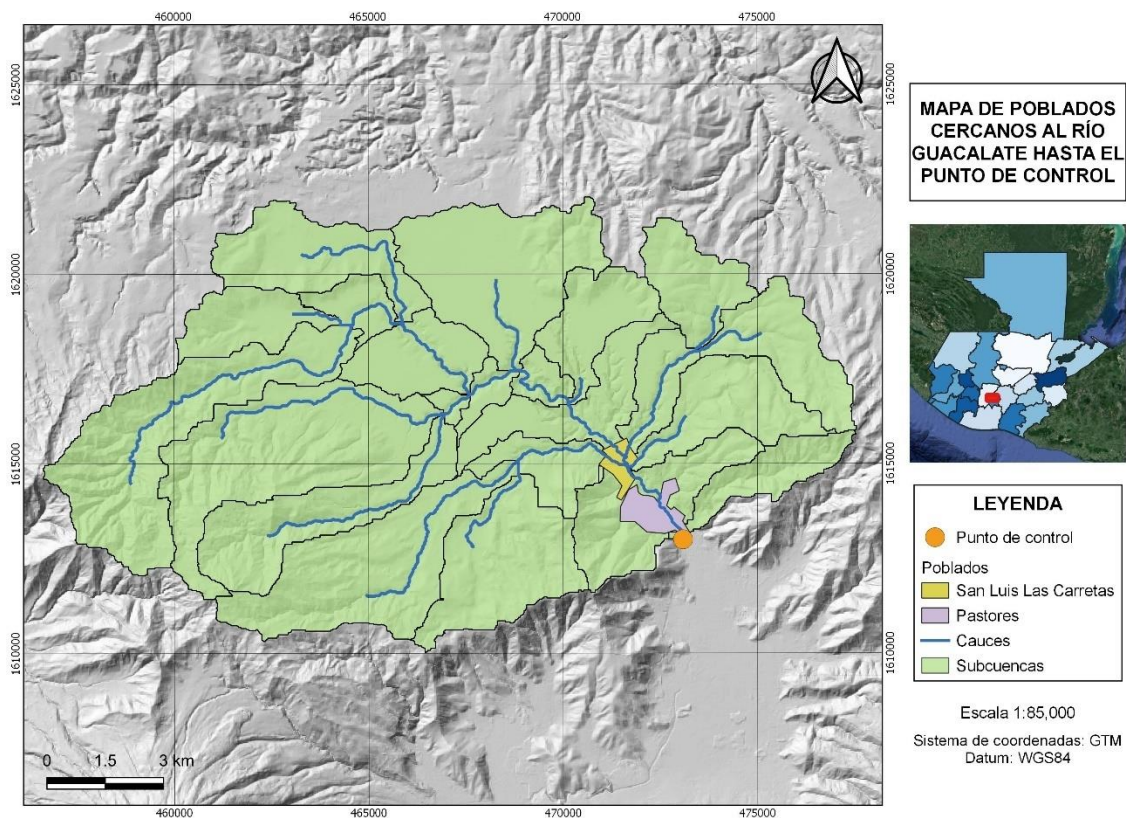


Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 3.14.15, por medio de sistemas de información geográfica.

<sup>1</sup> ARRIOLA, Jorge Luis. *Diccionario enciclopédico de Guatemala: A-K*. Ed. Univ. San Carlos de Guatemala, 2009.

En este estudio se delimitó la cuenca del río Guacalate hasta un punto de control ubicado cerca de la comunidad de Pastores, la cual pertenece al departamento de Sacatepéquez, con el fin de poder determinar las zonas de amenaza cercanas al río.

Figura 2. Poblados cercanos al punto de control



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 3.14.15, por medio de sistemas de información geográfica.

### 1.1. Características generales

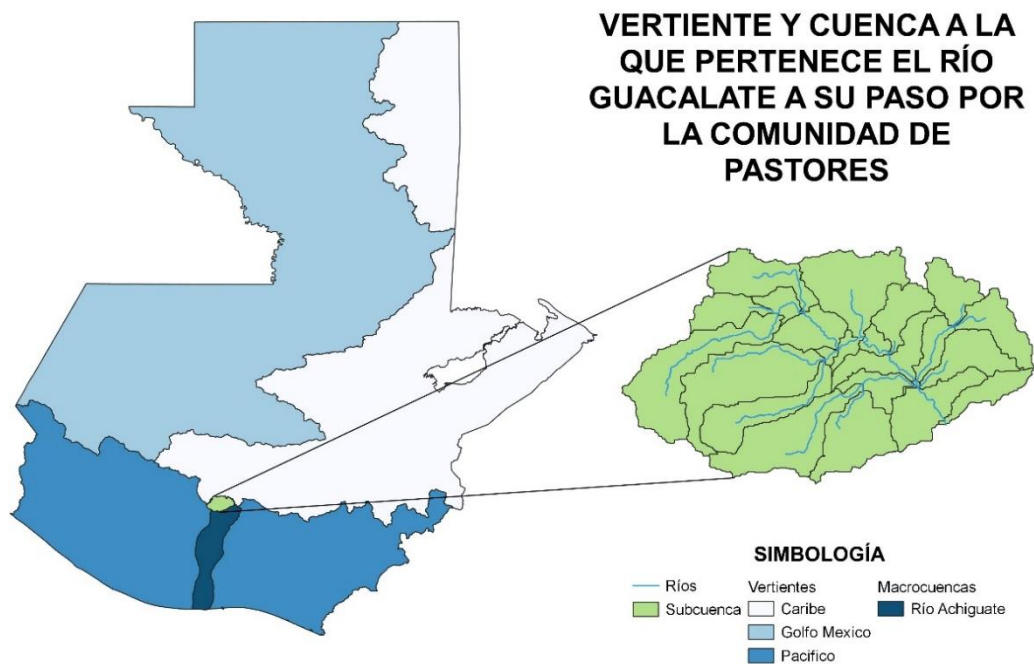
La cuenca del río Guacalate pertenece a la parte alta de la cuenca del río Achiguate y es donde se origina este.



Al formar parte de la vertiente del Pacífico, la cuenca del río Achiguate se caracteriza por tener pendientes fuertes en las partes altas de las cuencas cambiando bruscamente a pendientes mínimas en la planicie costera, creando zonas susceptibles a inundaciones.<sup>2</sup>

Todos los ríos que pertenecen a esta vertiente acarrean grandes volúmenes de material, especialmente escorias y cenizas volcánicas, debido a que en los límites de la vertiente se encuentra la cadena volcánica. El arrastre de material provoca que los ríos tengan cursos inestables, causando daños e inundaciones en la zona costera.

Figura 3. Ubicación de la cuenca del río Guacalate



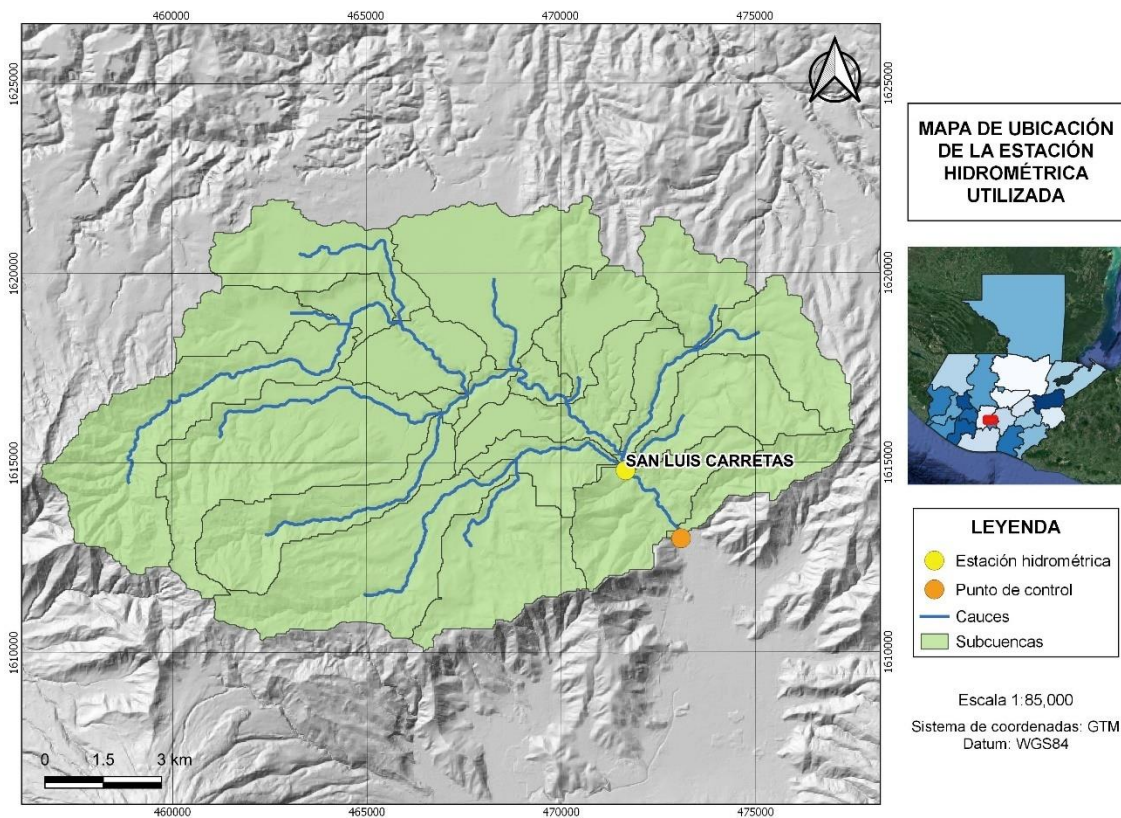
Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 3.14.15, por medio de sistemas de información geográfica.

<sup>2</sup> ICC (Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático). *Estudio hidrológico de la cuenca del río Achiguate*. Guatemala. 2012. p. 8.

La cuenca delimitada cuenta con un área de 166,75 km<sup>2</sup> hasta su punto de control y se dividió en 24 subcuencas para un análisis más representativo al momento de realizar alguna modelación.

Para la recaudación de información se ubicó la estación más cercana al río Guacalate y a la comunidad de Pastores. La estación hidrométrica seleccionada fue San Luis Las Carretas, la cual está ubicada en las coordenadas geográficas 14° 36' 12" N, 90° 45' 47" O en el municipio de Pastores, departamento de Sacatepéquez.

Figura 4. **Ubicación de la estación hidrométrica**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 3.14.15, por medio de sistemas de información geográfica.

### 1.1.1. Lecturas de niveles máximos históricos

A través de la estación hidrométrica de San Luis Las Carretas se obtuvo el registro de los niveles máximos que se han presentado en dicho lugar desde el año 2003 hasta el año 2019.

Con estos datos se obtuvo la siguiente tabla en donde se anotaron las lecturas de los niveles máximos, los meses y los años en los que han ocurrido. Las lecturas de niveles en la escala de la estación se miden en metros y el cero de dicha escala se localiza en la cota 1580,04 metros sobre el nivel del mar.

Tabla I. Lecturas de niveles máximos históricos

<b>Estación hidrométrica San Luis Las Carretas</b>			
<b>Año hidrológico</b>	<b>Máximo maximorum</b>	<b>Mes</b>	<b>Año</b>
2003 – 2004	2,30	Septiembre	2004
2004 – 2005	1,90	Septiembre	2004
2005 – 2006	3,20	Octubre	2005
2006 – 2007	2,80	Junio	2006
2007 – 2008	1,90	Agosto	2007
2008 – 2009	2,00	Junio	2008
2009 – 2010	2,00	Septiembre	2009
2010 – 2011	3,40	Mayo	2010
2011 – 2012	2,30	Octubre	2011
2012 – 2013	2,00	Mayo	2012
2013 – 2014	2,00	Junio	2013
2014 – 2015	1,20	Mayo, Junio	2014
2015 – 2016	1,50	Octubre	2015
2016 – 2017	1,50	Mayo	2016
2017 – 2018	2,50	Septiembre	2017
2018 – 2019	2,30	Junio	2018

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, utilizando información proporcionada por el INSIVUMEH.

Según los registros proporcionados por el INSIVUMEH, a partir de lectura de escala de 1,20 metros, ya empiezan algunos desbordamientos del río Guacalate. De 1,50 metros en adelante principian las inundaciones en la población de Pastores.

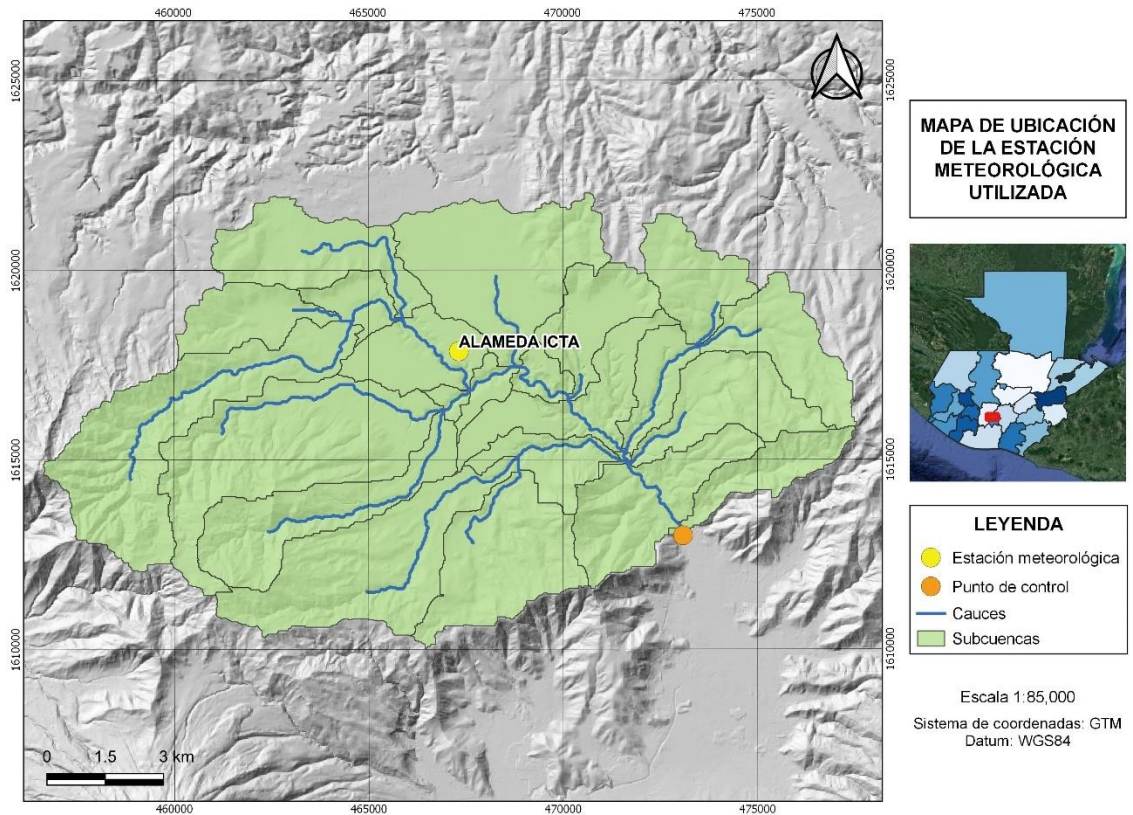
De lecturas de 2 metros en adelante, la inundación ya entra a las casas situadas a las márgenes del cauce del río y en las calles principales del centro de la población. Con lecturas de 2,50 metros, la inundación se transporta sobre la carretera principal de Antigua Guatemala – Chimaltenango, arrastrando grandes volúmenes de lodos y restos de basura vegetal de los márgenes del río.

Con lecturas de 3,20 metros se produce a la altura del Edificio Municipal una inundación con lodos que pueden alcanzar más o menos un metro de altura.

## **1.2. Caracterización climática**

Para realizar la caracterización climática del sitio se buscó la estación más cercana al río Guacalate y a la comunidad de Pastores. La estación meteorológica seleccionada fue Alameda ICTA, la cual se encuentra ubicada en las coordenadas geográficas 14° 38' 02" N, 90° 48' 12" O en el departamento de Chimaltenango.

Figura 5. **Ubicación de la estación meteorológica**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 3.14.15, por medio de sistemas de información geográfica.

A partir de los datos de la estación se obtuvieron los siguientes registros medios de diferentes variables climáticas:

### 1.2.1. **Temperatura media mensual**

La temperatura es un factor importante debido a que interviene en todas las etapas del ciclo hidrológico. Esta variable interviene como parámetro en las ecuaciones para calcular la evapotranspiración potencial.

La temperatura media mensual o anual es la media aritmética de las temperaturas medias diarias en un periodo considerado. Se muestra el comportamiento histórico mensual de los datos de temperatura media y su respectiva gráfica que abarca el periodo de 2000 al año 2019.

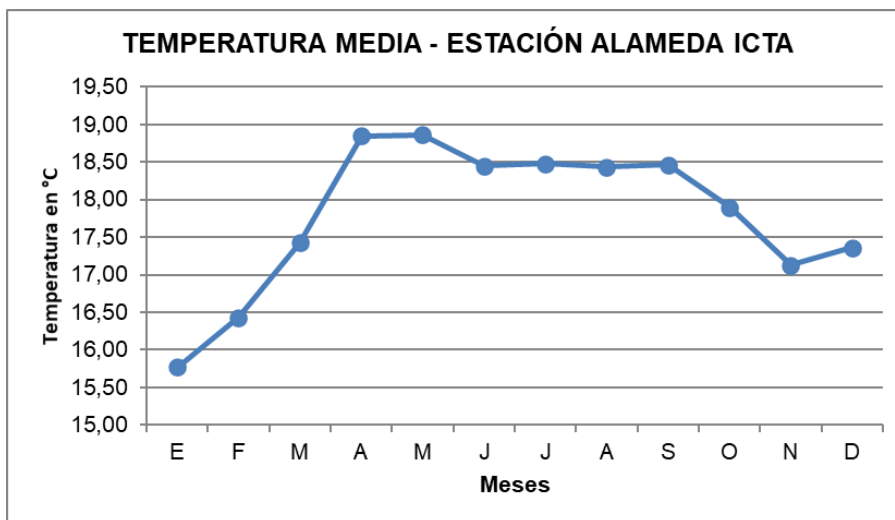
Tabla II. **Datos de temperatura media**

<b>ESTACIÓN ALAMEDA ICTA</b>			
<b>Temperatura Media en °C</b>			
<b>Enero</b>	15,77	<b>Julio</b>	18,48
<b>Febrero</b>	16,43	<b>Agosto</b>	18,43
<b>Marzo</b>	17,42	<b>Septiembre</b>	18,46
<b>Abril</b>	18,85	<b>Octubre</b>	17,90
<b>Mayo</b>	18,86	<b>Noviembre</b>	17,12
<b>Junio</b>	18,45	<b>Diciembre</b>	17,36

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, utilizando datos proporcionados por el INSIVUMEH.

Se observa que las temperaturas empiezan a aumentar para finales de abril que coinciden con el inicio de la época lluviosa, esto refleja que se mantienen condiciones cálidas y húmedas favoreciendo a la precipitación, es decir, favorece las lluvias en la región.

Figura 6. Gráfica de temperatura media



Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, utilizando datos proporcionados por el INSIVUMEH.

### 1.2.2. Brillo solar mensual

La duración del brillo solar representa el tiempo total durante el cual incide la luz solar sobre algún sector, entre el alba y el atardecer.<sup>3</sup> El total de horas de brillo solar de un lugar, es uno de los factores que determinan el clima de esa localidad. También puede definirse como las horas totales por día o por mes en las cuales la luz solar tiene una incidencia directa sin la afectación de la nubosidad.

Se muestra el comportamiento histórico mensual de los datos de brillo solar y su respectiva gráfica que abarca el periodo de 1991 al año 2019.

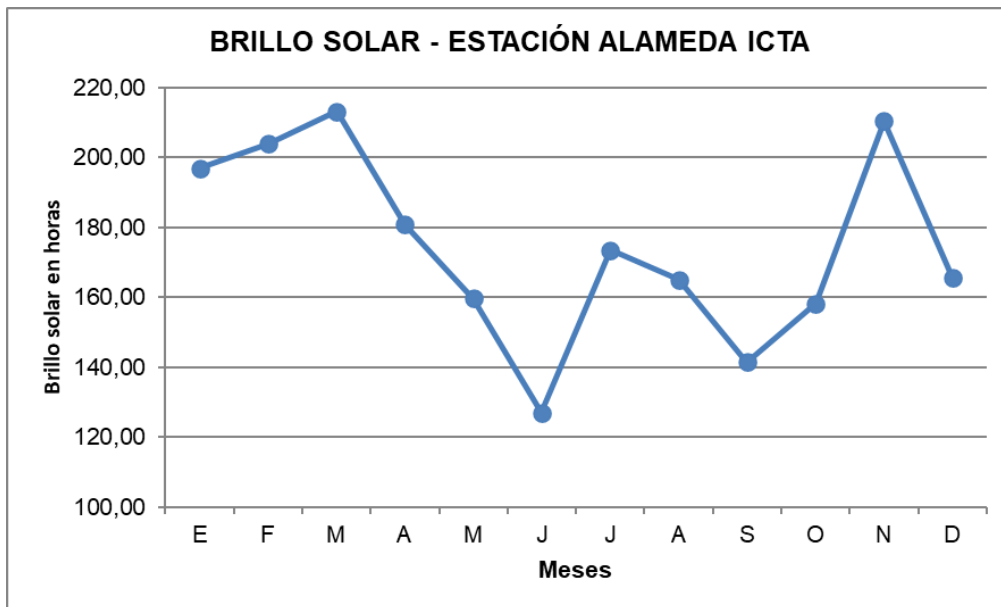
<sup>3</sup> Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). *Los componentes de una estación meteorológica*. Guatemala. Consulta: 03 de noviembre de 2020. <https://insivumeh.gob.gt/destacados-portada/los-componentes-de-una-estacion-meteorologica/>

Tabla III. Datos de brillo solar

ESTACIÓN ALAMEDA ICTA			
Brillo solar en horas			
<b>Enero</b>	196,95	<b>Julio</b>	173,48
<b>Febrero</b>	204,03	<b>Agosto</b>	165,16
<b>Marzo</b>	213,18	<b>Septiembre</b>	141,45
<b>Abril</b>	180,94	<b>Octubre</b>	158,21
<b>Mayo</b>	159,70	<b>Noviembre</b>	210,43
<b>Junio</b>	127,03	<b>Diciembre</b>	165,76

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, utilizando datos proporcionados por el INSIVUMEH.

Figura 7. Gráfica de brillo solar



Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, utilizando datos proporcionados por el INSIVUMEH.



Si hay menos brillo solar aparece más tiempo con nubosidad. El brillo solar va descendiendo desde marzo y llega a un mínimo en el mes de junio. Aumenta en el mes de julio y vuelve a caer en el mes de septiembre.

### 1.2.3. Humedad relativa media mensual

La humedad del aire se debe al vapor de agua que se encuentra presente en la atmósfera. Este vapor procede de la evaporación de los mares, océanos, ríos, lagos, plantas y otros seres vivos.<sup>4</sup>

Esta cantidad de vapor de agua que puede absorber el aire dependerá de la temperatura debido a que el aire caliente admite más vapor de agua que el aire frío.

La humedad relativa es la relación entre la tensión de vapor actual y la tensión de vapor de saturación a la misma temperatura, la cual se expresa en porcentaje. Esta variable es una de las formas en las que se puede expresar la humedad atmosférica.

Se muestra el comportamiento histórico mensual de los datos de humedad relativa y su respectiva gráfica que abarca el periodo de 2009 al año 2019.

Tabla IV. Humedad relativa media mensual

<b>ESTACIÓN ALAMEDA ICTA</b>			
<b>Humedad relativa en %</b>			
<b>Enero</b>	81,45	<b>Julio</b>	83,00
<b>Febrero</b>	80,70	<b>Agosto</b>	82,50

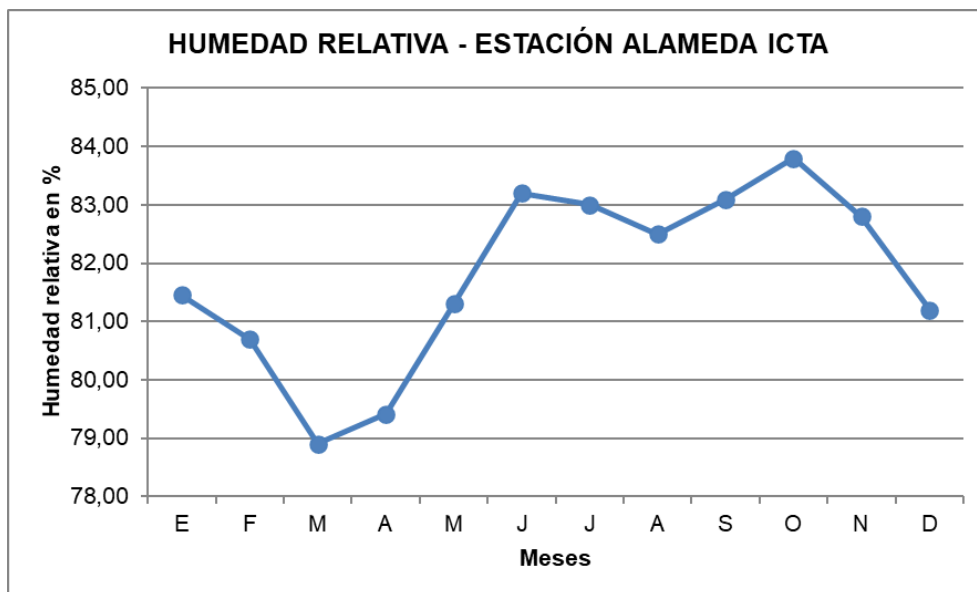
<sup>4</sup> Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). *Los componentes de una estación meteorológica*. Guatemala. Consulta: 03 de noviembre de 2020. <https://insivumeh.gob.gt/destacados-portada/los-componentes-de-una-estacion-meteorologica/>

Continuación de la Tabla IV.

<b>Marzo</b>	78,90	<b>Septiembre</b>	83,10
<b>Abril</b>	79,42	<b>Octubre</b>	83,80
<b>Mayo</b>	81,30	<b>Noviembre</b>	82,80
<b>Junio</b>	83,20	<b>Diciembre</b>	81,20

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, utilizando datos proporcionados por el INSIVUMEH.

Figura 8. **Gráfica de humedad relativa media mensual**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, utilizando datos proporcionados por el INSIVUMEH.

Esta variable es un indicador de la cantidad de las partículas de agua. Partiendo del mes de abril se empieza a visualizar un incremento en el porcentaje de humedad relativa coincidiendo con el inicio de la época lluviosa. Además, se ve la disminución en los meses de julio y agosto.

#### 1.2.4. Precipitación media mensual

La precipitación es el producto de la condensación del vapor de agua que cae desde las nubes y se deposita en la superficie terrestre. Esta variable se expresa en términos de la profundidad de agua que cubriría una proyección horizontal de la superficie terrestre, generalmente en unidades lineales (mm).

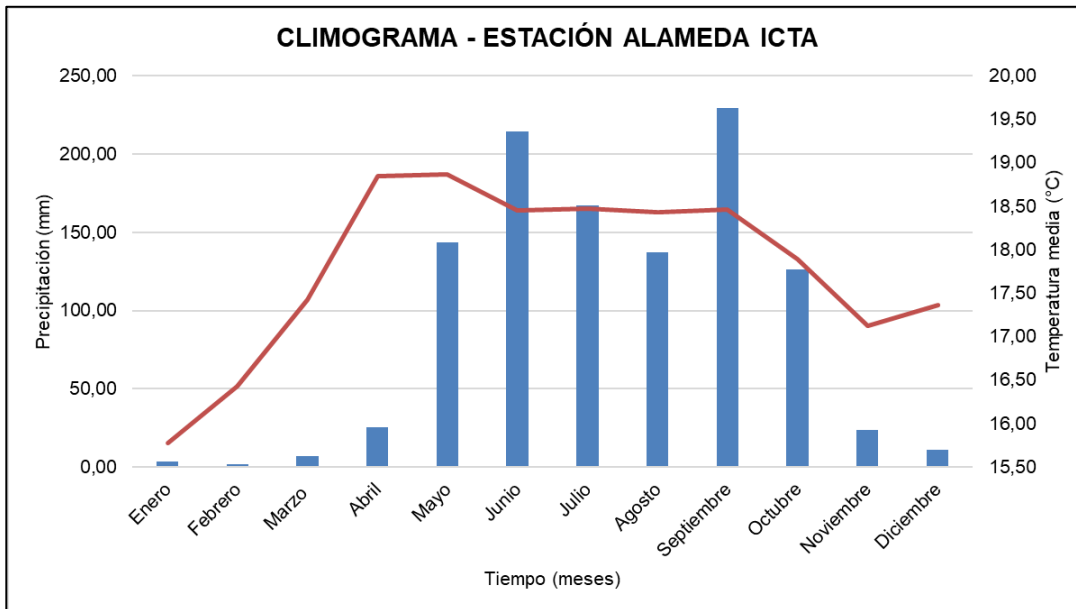
Se muestra el comportamiento histórico mensual de los datos de precipitación y su respectiva gráfica que abarca el periodo de 1990 al año 2019. Además de los datos de temperatura media para graficar un climograma.

Tabla V. Datos para el climograma

Mes	Precipitación (mm)	Temperatura media (°C)
Enero	3,23	15,77
Febrero	1,54	16,43
Marzo	6,88	17,42
Abril	25,32	18,85
Mayo	143,50	18,86
Junio	214,17	18,45
Julio	167,33	18,48
Agosto	137,12	18,43
Septiembre	229,45	18,46
Octubre	126,47	17,90
Noviembre	23,47	17,12
Diciembre	10,87	17,36

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, utilizando datos proporcionados por el INSIVUMEH.

Figura 9. **Climograma de la estación Alameda ICTA**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, utilizando datos proporcionados por el INSIVUMEH.

La zona mantiene un régimen de lluvia normal que comienza en el mes de mayo y se ve un descenso de precipitación en el mes de julio y agosto coincidiendo con el periodo de la canícula.

### 1.3. Balance hídrico

En un ciclo cerrado, el principio fundamental señala que la masa no se destruye ni se crea. Esto sucede en el ciclo hidrológico y se tiene la ecuación de balance hídrico:

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Cambio de almacenamiento}$$

El balance hídrico que se desarrolló muestra cuándo comienza y termina la época lluviosa en la región. Además, indica en qué meses hay déficit de agua. Debido a que no se contaba con información de caudales suficientes se realizó un balance hídrico climático, el cual depende principalmente de los datos de lluvia y los de temperaturas.

### 1.3.1. Evapotranspiración potencial utilizando el método de Hargreaves

“La evapotranspiración potencial es la cantidad máxima posible de agua que perdería el suelo por evaporación y por transpiración, suponiendo que el mismo se mantuviera con una capacidad de campo permanentemente completa y con un desarrollo vegetal óptimo”<sup>5</sup>.

“Con el método se utilizan parámetros térmicos y radiación solar, que estima a partir de la radiación solar extraterrestre, para predecir efectivamente la variación de evapotranspiración potencial. La ecuación se expresa de la siguiente manera”<sup>6</sup>.

$$ETP = 0,005625 \cdot R_E \cdot \left(\frac{n}{N}\right) \cdot (1,8 T + 32)$$

Donde:

ETP = evapotranspiración potencial en mm/día

R<sub>E</sub> = radiación solar extraterrestre en mm/día

---

<sup>5</sup> VÁSQUEZ V., Absalón; VÁSQUEZ R., Issaak; VÁSQUEZ R., Cristian; CAÑAMERO K., Miguel. *Fundamentos de la ingeniería de riego*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina, 2017. p. 185.

<sup>6</sup> OROZCO FUENTES, Elfego Odvin. *Curso de Hidrología*. Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2009.

n = insolación en horas

N = horas luz máximas posibles

T = temperatura media en °C

Tabla VI. **Variables climáticas para el método de Hargreaves**

Variables	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR
Tmedia (°C)	18,86	18,45	18,48	18,43	18,46	17,90	17,12	17,36	15,77	16,43	17,42	18,85
Insolación (hr)	159,7	127,0	173,5	165,2	141,5	158,2	210,4	165,8	197,0	204,0	213,2	180,9

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019.

Tabla VII. **Valores de radiación solar extraterrestre**

Radiación solar extraterrestre (R <sub>E</sub> )												
mm/día	15,7	15,7	15,7	15,5	14,9	13,8	12,5	11,7	12,1	13,4	14,7	15,5

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019.

Tabla VIII. **Valores de horas de luz máximas posibles**

Horas luz máximas posibles (N)												
horas	397,2	389,8	400,7	391,6	366,8	365,9	343,1	348,5	351,0	325,7	373,4	374,1

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019.

La radiación extraterrestre y las horas luz máximas posibles se obtiene a través de tablas que se presentan a continuación:

Figura 10. Radiación extraterrestre ( $R_E$ ) expresada en equivalente de evaporación (mm/día)

Hemisferio Norte												Lat	Hemisferio Sur											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
3.8	6.1	9.4	12.7	15.8	17.1	16.4	14.1	10.9	7.4	4.5	3.2	50°	17.5	14.7	10.9	7.0	4.2	3.1	3.5	5.5	8.9	12.9	16.5	18.2
4.3	6.6	9.8	13.0	15.9	17.2	16.5	14.3	11.2	7.8	5.0	3.7	48°	17.6	14.9	11.2	7.5	4.7	3.5	4.0	6.0	9.3	13.2	16.6	18.2
4.9	7.1	10.2	13.3	16.0	17.2	16.6	14.5	11.5	8.3	5.5	4.3	46°	17.7	15.1	11.5	7.9	5.2	4.0	4.4	6.5	9.7	13.4	16.7	18.3
5.3	7.6	10.6	13.7	16.1	17.2	16.6	14.7	11.9	8.7	6.0	4.7	44°	17.8	15.3	11.9	8.4	5.7	4.4	4.9	6.9	10.2	13.7	16.7	18.3
5.9	8.1	11.0	14.0	16.2	17.3	16.7	15.0	12.2	9.1	6.5	5.2	42°	17.8	15.5	12.2	8.8	6.1	4.9	5.4	7.4	10.6	14.0	16.8	18.3
6.4	8.6	11.4	14.3	16.4	17.3	16.7	15.2	12.5	9.6	7.0	5.7	40°	17.9	15.7	12.5	9.2	6.6	5.3	5.9	7.9	11.0	14.2	16.9	18.3
6.9	9.0	11.8	14.5	16.4	17.2	16.7	15.3	12.8	10.0	7.5	6.1	38°	17.9	15.8	12.8	9.6	7.1	5.8	6.3	8.3	11.4	14.4	17.0	18.3
7.4	9.4	12.1	14.7	16.4	17.2	16.7	15.4	13.1	10.6	8.0	6.6	36°	17.9	16.0	13.2	10.1	7.5	6.3	6.6	8.8	11.7	14.6	17.0	18.2
7.9	9.8	12.4	14.8	16.4	17.1	16.8	15.5	13.4	10.8	8.5	7.2	34°	17.8	16.1	13.5	10.5	8.0	6.8	7.2	9.2	12.0	14.9	17.1	18.2
8.3	10.2	12.8	15.0	16.5	17.0	16.8	15.6	13.6	11.2	9.0	7.8	32°	17.8	16.2	13.8	10.9	8.5	7.3	7.7	9.6	12.4	15.1	17.2	18.1
8.8	10.7	13.1	15.2	16.5	17.0	16.6	15.7	13.9	11.6	9.5	8.3	30°	17.8	16.4	14.0	11.3	8.9	7.8	8.1	10.1	12.7	15.3	17.3	18.1
9.3	11.1	13.4	15.3	16.5	16.8	16.7	15.7	14.1	12.0	9.9	8.8	28°	17.7	16.4	14.3	11.6	9.3	8.2	8.6	10.4	13.0	15.4	17.2	17.9
9.8	11.5	13.7	15.3	16.4	16.7	16.6	15.7	14.3	12.3	10.3	9.3	26°	17.6	16.4	14.4	12.0	9.7	8.7	9.1	10.9	13.2	15.5	17.2	17.8
10.2	11.9	13.9	15.4	16.4	16.6	16.5	15.8	14.5	12.6	10.7	9.7	24°	17.5	16.5	14.6	12.3	10.2	9.1	9.5	11.2	13.4	15.6	17.1	17.7
10.7	12.3	14.2	15.5	16.3	16.4	16.4	15.8	14.6	13.0	11.1	10.2	22°	17.4	16.5	14.8	12.6	10.6	9.6	10.0	11.6	13.7	15.7	17.0	17.5
11.2	12.7	14.4	15.6	16.3	16.4	16.3	15.9	14.8	13.3	11.6	10.7	20°	17.3	16.5	15.0	13.0	11.0	10.0	10.4	2.0	13.9	15.8	17.0	17.4
11.6	13.0	14.6	15.6	16.1	16.1	16.1	15.8	14.9	13.6	12.0	11.1	18°	17.1	16.5	15.1	13.2	11.4	10.4	10.8	12.3	14.1	15.8	16.8	17.1
12.0	13.3	14.7	15.6	16.0	15.9	15.9	15.7	15.0	13.9	12.4	11.6	16°	16.9	16.4	15.2	13.5	11.7	10.8	11.2	12.6	14.3	15.8	16.7	16.8
12.4	13.6	14.9	15.7	15.8	15.7	15.7	15.7	15.1	14.1	12.8	12.0	14°	16.7	16.4	15.3	13.7	12.1	11.2	11.6	12.9	14.5	15.8	16.5	16.6
12.8	13.9	15.1	15.7	15.7	15.5	15.5	15.6	15.2	14.4	13.3	12.5	12°	16.6	16.3	15.4	14.0	12.5	11.6	12.0	13.2	14.7	15.8	16.4	16.5
13.2	14.2	15.3	15.7	15.5	15.3	15.3	15.5	15.3	14.7	13.6	12.9	10°	16.4	16.3	15.5	14.2	12.8	12.0	12.4	13.5	14.8	15.9	16.2	16.2
13.6	14.5	15.3	15.6	15.3	15.0	15.1	15.4	15.3	14.8	13.9	13.3	8°	16.1	16.1	15.5	14.4	13.1	12.4	12.7	13.7	14.9	15.8	16.0	16.0
13.5	14.8	15.4	15.4	15.1	14.7	14.9	15.2	15.3	15.0	14.2	13.7	6°	15.8	16.0	15.6	14.7	13.4	12.8	13.1	14.0	15.0	15.7	15.8	15.7
14.3	15.0	15.5	15.5	14.9	14.4	14.6	15.1	15.3	15.1	14.5	14.1	4°	15.5	15.8	15.6	14.9	13.8	13.2	13.4	14.3	15.1	15.6	15.5	15.4
14.7	15.0	15.0	15.3	14.6	14.2	14.3	14.9	15.3	15.3	14.8	14.4	2°	15.3	15.7	15.7	15.1	14.1	13.5	13.7	14.5	15.2	15.5	15.3	15.1
15.0	15.5	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8	0°	15.0	15.2	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8

Fuente: VÁSQUEZ V., Absalón; VÁSQUEZ R., Issaak; VÁSQUEZ R., Cristian; CAÑAMERO K., Miguel. *Fundamentos de la ingeniería de riego*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina, 2017. p. 189.

Figura 11. **Duración máxima diaria media de las horas de fuente de insolación (N) en diferentes meses y latitudes**

Latitud Norte	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.
Latitud Sur	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.
50°	8.5	10.1	11.8	13.8	15.4	16.3	15.9	14.5	12.7	10.8	9.1	8.1
48°	8.8	10.2	11.8	13.6	15.2	16.0	15.6	14.3	12.6	10.9	9.3	8.3
46°	9.1	10.4	11.9	13.5	14.9	15.7	15.4	14.2	12.6	10.9	9.5	8.7
44°	9.3	10.5	11.9	13.4	14.7	15.4	15.2	14.0	12.6	11.0	9.7	8.9
42°	9.4	10.6	11.9	13.4	14.6	15.2	14.9	13.9	12.9	11.1	9.8	9.1
40°	9.6	10.7	11.9	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.5	11.2	10.0	9.3
35°	10.1	11.0	11.9	13.1	14.0	14.5	14.3	13.5	12.4	11.3	10.3	9.8
30°	10.4	11.1	12.0	12.9	13.6	14.0	13.9	13.2	12.4	11.5	10.6	10.2
25°	10.7	11.3	12.0	12.7	13.3	13.7	13.5	13.0	12.3	11.6	10.9	10.6
20°	11.0	11.5	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
15°	11.3	11.6	12.0	12.5	12.3	13.0	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
10°	11.6	11.8	12.0	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.8	11.6	11.5
5°	11.8	11.9	12.0	12.2	12.3	12.4	12.3	12.3	12.1	12.0	11.9	11.8
0°	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1

Fuente: VÁSQUEZ V., Absalón; VÁSQUEZ R., Issaak; VÁSQUEZ R., Cristian; CAÑAMERO K., Miguel. Fundamentos de la ingeniería de riego. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina, 2017. p. 190.

Tabla IX. **Evapotranspiración por el método de Hargreaves**

EVAPOTRANSPIRACIÓN MÉTODO DE HARGREAVES												
días/mes	31	30	31	30	30	31	30	31	31	28	31	30
mm/día	2,34	1,88	2,50	2,40	2,11	2,16	2,71	1,98	2,31	2,91	2,99	2,78
mm/mes	72,60	56,30	77,35	71,90	63,25	66,81	81,28	61,38	71,50	81,41	92,72	83,40
<b>Total ETP = 879,89 mm/año</b>												

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019.



### 1.3.2. Evapotranspiración potencial utilizando el método de Blaney – Criddle

“El método considera que la evapotranspiración potencial es proporcional al producto de la temperatura por el porcentaje de horas de sol diarias anuales durante un periodo considerado, generalmente un mes”<sup>7</sup>:

$$ETP = (0,24 + 0,0311 T) \cdot (0,457 T + 8,13) \cdot p$$

Donde:

ETP = evapotranspiración potencial en mm/día

T = temperatura media en °C

p = porcentaje de horas de luz del total anual

Tabla X. **Variables climáticas para el método de Blaney – Criddle**

Variables	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR
Tmedia (°C)	18,86	18,45	18,48	18,43	18,46	17,90	17,12	17,36	15,77	16,43	17,42	18,85
Insolación (hr)	159,7	127,03	173,5	165,16	141,45	158,21	210,4	165,8	197	204	213,18	180,94

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019.

Tabla XI. **Porcentaje de horas de luz del total anual**

% de horas de luz total anual (p)												
%	8,97	8,8	9,05	8,84	8,28	8,26	7,75	7,87	7,93	7,36	8,43	8,46

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019.

<sup>7</sup> OROZCO FUENTES, Elfego Odvin. *Curso de Hidrología*. Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2009.

El porcentaje de horas de luz del total anual se obtiene a través de una tabla que se presenta a continuación:

Figura 12. **Porcentaje de horas en la ecuación de Blaney – Criddle**

Latitud grados	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<b>Norte</b>												
60	4.67	5.65	8.08	9.65	11.74	12.39	12.31	10.70	8.57	6.98	5.04	4.22
50	5.98	6.30	8.24	9.24	10.68	10.91	10.99	10.00	8.46	7.45	6.10	5.65
40	6.76	6.72	8.33	8.95	10.02	10.08	10.22	9.54	8.39	7.75	6.72	6.52
35	7.05	6.88	8.35	8.83	9.76	9.77	9.93	9.37	8.36	7.87	6.97	6.86
30	7.30	7.03	8.38	8.72	9.53	9.49	9.67	9.22	8.33	7.99	7.19	7.15
25	7.53	7.14	8.39	8.61	9.33	9.23	9.45	9.09	8.32	8.09	7.40	7.42
20	7.74	7.25	8.41	8.52	9.15	9.00	9.25	8.96	8.30	8.18	7.58	7.66
15	7.94	7.36	8.43	8.44	8.98	8.80	9.05	8.83	8.28	8.26	7.75	7.88
10	8.13	7.47	8.45	8.37	8.81	8.60	8.86	8.71	8.25	8.34	7.91	8.10
0	8.50	7.66	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50
<b>Sur</b>												
10	8.86	7.87	8.53	8.09	8.18	7.86	8.14	8.27	8.17	8.62	8.53	8.88
20	9.24	8.09	8.57	7.94	7.85	7.43	7.76	8.03	8.13	8.76	8.87	9.33
30	9.70	8.33	8.62	7.73	7.45	6.96	7.31	7.76	8.07	8.97	9.24	9.85
40	10.27	8.63	8.67	7.49	6.97	6.37	6.76	7.41	8.02	9.21	9.71	10.49

Fuente: MONSALVE SAÉNZ, Germán. *Hidrología en la ingeniería*. Segunda Edición. Colombia: Alfaomega, 1999. p. 169.

Tabla XII. **Evapotranspiración por el método de Blaney – Criddle**

EVAPOTRANSPIRACIÓN MÉTODO DE BLANEY – CRIDDLE												
mm/mes	124,20	118,59	122,18	119,01	111,68	107,31	95,54	98,59	88,85	86,44	106,06	117,02
Total ETP = 1295,48 mm/año												

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019.

### 1.3.3. Balance hídrico comparación

Se presenta la comparación de balance hídrico.

Tabla XIII. **Balance hídrico por medio del método de Hargreaves**

	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR
<b>P (mm)</b>	143,50	214,17	167,33	137,12	229,45	126,47	23,47	10,87	3,23	1,54	6,88	25,32
<b>ETP (mm)</b>	72,60	56,30	77,35	71,90	63,25	66,81	81,28	61,38	71,50	81,41	92,72	83,40
<b>BALANCE</b>	<b>70,90</b>	<b>157,87</b>	<b>89,98</b>	<b>65,22</b>	<b>166,20</b>	<b>59,66</b>	<b>-57,81</b>	<b>-50,51</b>	<b>-68,27</b>	<b>-79,87</b>	<b>-85,84</b>	<b>-58,08</b>

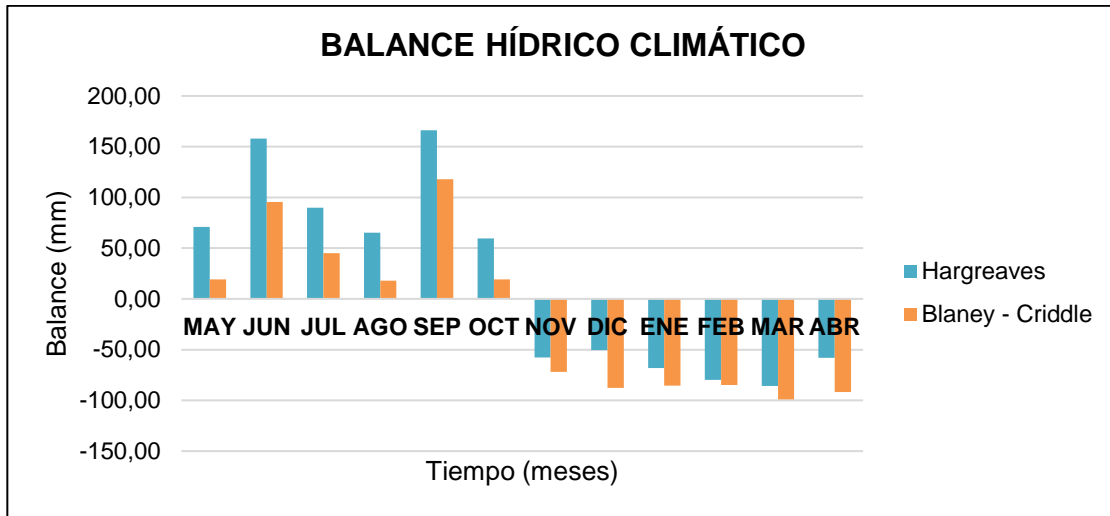
Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019.

Tabla XIV. **Balance hídrico por medio del método de Blaney – Criddle**

	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR
<b>P (mm)</b>	143,50	214,17	167,33	137,12	229,45	126,47	23,47	10,87	3,23	1,54	6,88	25,32
<b>ETP (mm)</b>	124,20	118,59	122,18	119,01	111,68	107,31	95,54	98,59	88,85	86,44	106,06	117,02
<b>BALANCE</b>	<b>19,29</b>	<b>95,58</b>	<b>45,15</b>	<b>18,11</b>	<b>117,77</b>	<b>19,16</b>	<b>-72,07</b>	<b>-87,73</b>	<b>-85,62</b>	<b>-84,90</b>	<b>-99,18</b>	<b>-91,70</b>

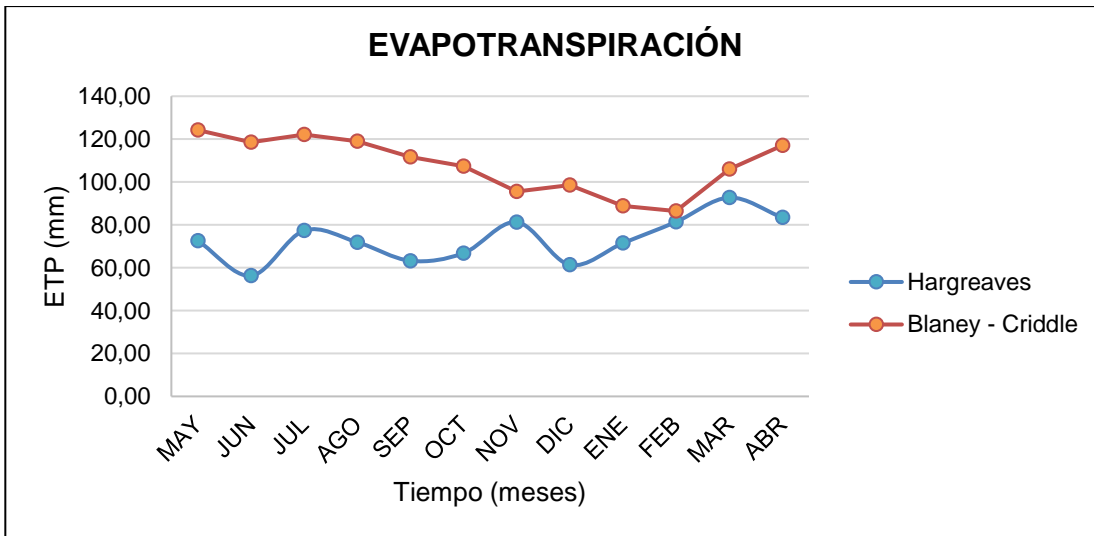
Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019.

Figura 13. **Balance hídrico climático**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019.

Figura 14. **Comparación de los métodos en relación a los datos de evapotranspiración**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019.

Según lo observado en las gráficas del mes de mayo hasta el mes de octubre existe un excedente de precipitación. En los meses de noviembre hasta abril, se puede presentar posibles problemas de abastecimiento de aguas superficiales porque existe poca precipitación, y la que existe sería rápidamente afectada por la evapotranspiración potencial.

Se debe tomar en cuenta que la evapotranspiración potencial es un valor máximo que puede ocurrir, de lo contrario para obtener el verdadero valor, se debería obtener la evapotranspiración real.

La evapotranspiración potencial obtenida permite corroborar los meses en los que se da la época lluviosa (de mayo a octubre) y la época seca (de noviembre a abril).

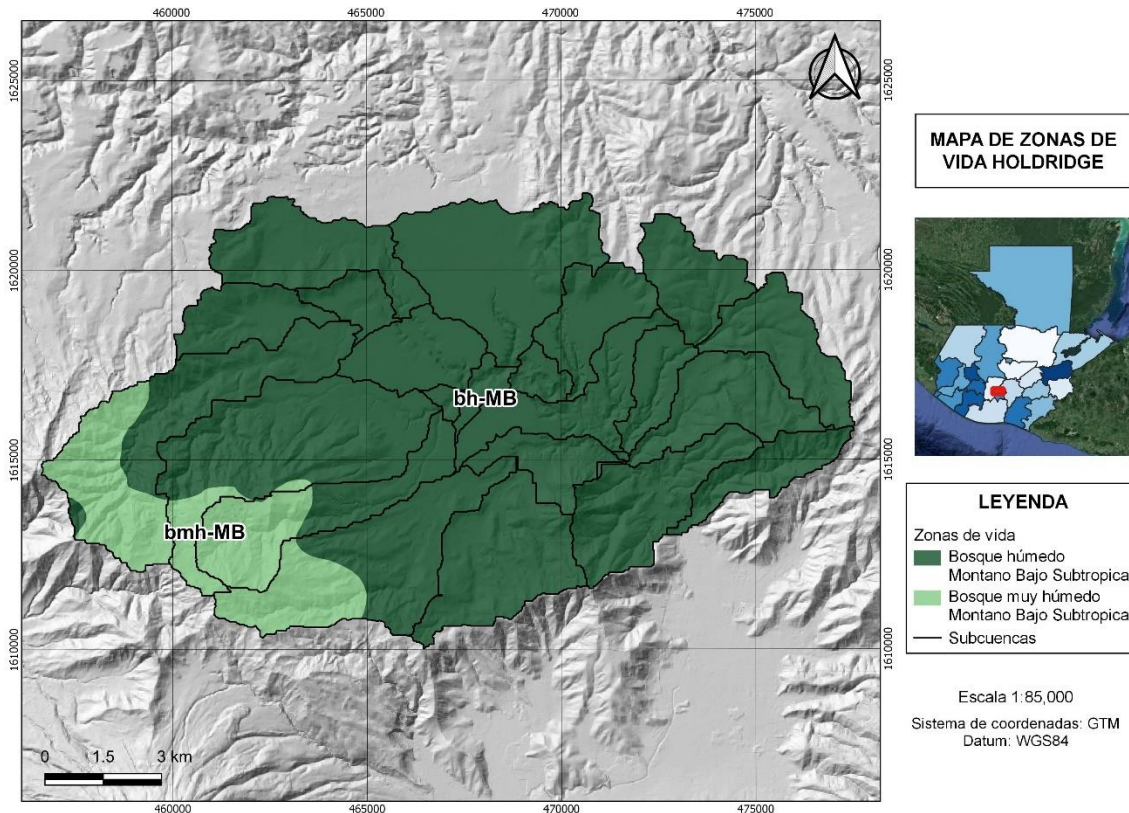
#### **1.4. Zonas de vida Holdridge**

En la cuenca de análisis se presentan dos tipos diferentes de clasificación de zonas de vida como se ve en el siguiente mapa<sup>8</sup>:

---

<sup>8</sup> IARNA-URL (Instituto de Investigación y Proyección sobre Ambiente Natural y Sociedad de la Universidad Rafael Landívar). *Ecosistemas de Guatemala basado en el sistema de clasificación de zonas de vida*. Guatemala. 2018.

Figura 15. Zonas de vida Holdridge dentro de la cuenca



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 3.14.15, por medio de sistemas de información geográfica.

#### 1.4.1. Bosque húmedo montano bajo subtropical (bh-MB)

Esta clasificación abarca mayor área de la cuenca delimitada y en ella se encuentra la comunidad de estudio. Esta zona comprende una franja que se extiende desde el municipio de Mixco, en el departamento de Guatemala dirigiéndose al noroeste del país, pasando por los municipios de San Juan, San Pedro, San Lucas, Sacatepéquez, Chimaltenango, San Martín Jilotepeque, Zaragoza, Santa Cruz Balanyá, San José Poaquil, Chichicastenango, Santa Cruz

del Quiché, Momostenango, Huehuetenango, hasta la frontera de México. Además, hay una pequeña franja que rodea el Lago de Atitlán.

El patrón de lluvias que presenta varía desde 1057 mm hasta 1588 mm; promediando 1344 mm de precipitación total anual. Las biotemperaturas del sector van de 15 °C a 23 °C. La topografía en general es plana y está dedicada principalmente a cultivos agrícolas.

#### **1.4.2. Bosque muy húmedo montano bajo subtropical (bmh-MB)**

En esta zona la precipitación total anual va de 2065 mm a 3900 mm, en promedio 2730 mm. Las temperaturas en promedio son de 12,5 a 18,6 °C. El bosque merece ser manejado cuidadosamente debido a que por la densidad poblacional tiende a disminuir, y eso da paso a la erosión en las pendientes fuertes.





## 2. CONCEPTOS GENERALES DE HIDRÁULICA FLUVIAL

“La Hidráulica Fluvial es un elemento importante de la hidráulica general”<sup>9</sup>. Esta se dedica especialmente al estudio de los ríos, tomando en cuenta sus componentes, es decir, el movimiento del agua, los sedimentos, la influencia que genera la vegetación y las deformaciones del cauce, sin incluir el análisis de la vida acuática.

En el estudio de los ríos, hay que tener en cuenta las siguientes tres ideas:

- Los ríos son una fuente de aprovechamiento para la humanidad. Se requiere de obras complejas de ingeniería para satisfacer una demanda y obtener una calidad de vida. Por lo cual se toma en cuenta el comportamiento de dichas obras.
- Los ríos son elementos naturales de los cuales hay que defenderse. Las obras de control y el tratamiento de avenidas e inundaciones es parte fundamental de estudio.
- Los ríos deben ser defendidos de toda agresión humana. La contaminación ha limitado en gran manera el uso del agua. El agua en su naturaleza es prácticamente pura, por eso se debe cuidar para que su aprovechamiento sea económico.

En la Hidráulica Fluvial se estudian los canales naturales, es decir, aquellos que no están revestidos por lo cual son susceptibles a ser erosionados. Por ser parte integral de una cuenca pueden presentar diversos problemas que requieren

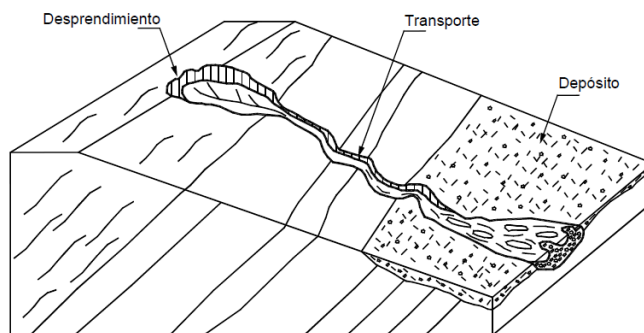
---

<sup>9</sup> OCHOA RUBIO, Tomás. *Hidráulica de ríos y procesos morfológicos*. Primera edición. Bogotá, Colombia: Ecoe Ediciones, 2011. p. 9.

un estudio más riguroso para presentar la mejor solución. La información que provee este campo, tiene que traducirse en acciones concretas para realizar el diseño, construcción y operación de estructuras hidráulicas.

Cuando se construye una obra en un río para obtener algún tipo de beneficio se debe tomar en cuenta que se puede estar generando, también, efectos negativos. Estos efectos secundarios pueden ser catastróficos. Por estos motivos se debe tener la capacidad de predecir el comportamiento fluvial del sistema. El sistema fluvial está compuesto por tres zonas: de producción de sedimentos, de transporte y de depositación.

Figura 16. **Componentes del sistema fluvial**



Fuente: SUÁREZ DÍAZ, Jaime. *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2001. p. 16.

## 2.1. Generalidades de las corrientes naturales

Para predecir el comportamiento del río es necesario determinar las características morfológicas de la corriente, la geología, los sedimentos que transporta, la hidrología y la hidráulica. Los factores y sus respectivas variables a tomar en cuenta para analizar un río son los siguientes:

Tabla XV. **Factores para analizar ríos**

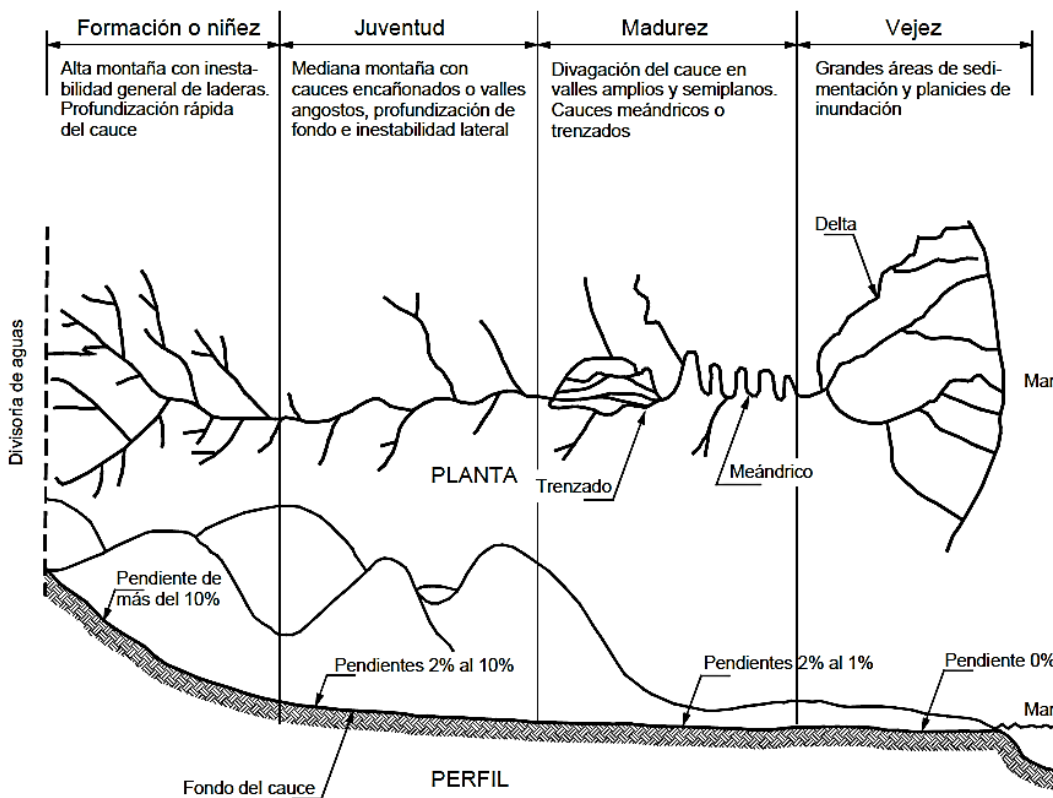
<b>Factores</b>	<b>Variables</b>
<b>Tiempo</b>	Historia geológica, tiempo moderno, tiempo reciente y tiempo futuro de análisis.
<b>Geología</b>	Litología, tectónica, estructura, geomorfología, meteorización y heterogeneidad geológica.
<b>Suelos</b>	Tipo, gradación y peso específico; distribución de los diferentes tipos de suelo en la cuenca; composición química de las partículas; cohesión y fricción; resistencia a la alteración física y química; grado de densificación; permeabilidad – infiltración y erosionabilidad.
<b>Hidrología</b>	Lluvias anuales – mensuales – diarias – horarias, intensidades máximas de aguaceros, magnitud – intensidad y duración de las lluvias, caudales, tipo y forma del hidrograma.
<b>Cobertura vegetal</b>	Tipo de vegetación, porcentaje de cobertura vegetal y su distribución, prácticas de cultivos y modificaciones de la cobertura por acción antrópica.
<b>Topografía</b>	Topografía, pendiente, morfología de la cuenca; perfil longitudinal del río; morfología en planta, tipo de río; sinuosidad, radios de curvatura, ancho de divagación, distancia entre meandros; distancia entre barras e islas, alineamiento general, sección, ancho; profundidad, fondo, formas del fondo, formas de dunas o barras, rápidos y fosas.
<b>Hidráulica</b>	Pendiente del flujo, rugosidad del fondo del cauce, velocidad, distribución de velocidades, radio hidráulico, fuerza tractiva, resistencia al flujo y poder de la corriente.
<b>Sedimentos</b>	Disponibilidad de sedimentos y localización, granulometría de la carga de fondo, granulometría de partículas en suspensión, velocidad de caída y mecánica del transporte.
<b>Alteraciones de origen antrópico</b>	Sitios, volúmenes y procedimientos de exploración de materiales en el cauce y riberas; localización y características de estructuras en el río (como puentes); estructuras de orilla; canales de riego; presas; localización de asentamientos humanos y rectificación del cauce.

Fuente: SUÁREZ DÍAZ, Jaime. *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2001. p. 86.

### 2.1.1. Etapas de la corriente de agua

Los tramos de un río se pueden diferenciar en etapas y esto permite evaluar el comportamiento erosivo. Estas son: niñez, juventud, madurez y vejez.

Figura 17. Representación de las etapas de un río en zonas tropicales



Fuente: SUÁREZ DÍAZ, Jaime. *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2001. p. 87.

#### 2.1.1.1. Etapa de formación o niñez

En las zonas de alta montaña las corrientes poseen una cuenca en forma de embudo con laderas que presentan pendientes muy altas que favorecen la

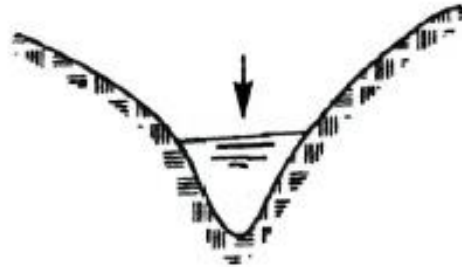
reunión rápida de las aguas. Por lo general, las corrientes que forman la corriente principal se dan en épocas lluviosas. La mayor cantidad de sedimentos debido a la erosión son provenientes de esta zona. Las pequeñas corrientes son semi-rectas con cambios bruscos de pendiente y de dirección. Es común que se encuentren cauces en V.

#### **2.1.1.2. Etapa de juventud (ríos de montaña)**

En esta etapa los ríos corren en valles angostos que con frecuencia se encañonan y presentan laderas con pendientes muy fuertes. La corriente presenta una pendiente mediana y grandes velocidades. La velocidad de la corriente durante las crecidas varía de 1,00 m/s a 2,50 m/s, y en ocasiones, puede llegar hasta 5,00 m/s. Debido a las velocidades, el flujo arrastra cantos rodados y bloques, además el cauce puede ser recto o presentar suaves curvaturas.

El lecho está formado por bloques, cantos rodados con un poco de grava y casi nada de finos. Las corrientes de agua en esta etapa son agentes de erosión que presentan un régimen torrencial. La energía del río es empleada en profundizar el cauce.

Figura 18. **Sección transversal típica de un río de montaña**



Fuente: OCHOA RUBIO, Tomás. *Hidráulica de ríos y procesos morfológicos*. Ecoe ediciones, 2011. p. 322.

### **2.1.1.3. Etapa de madurez (ríos de piedemonte)**

En esta etapa los ríos presentan profundidades de agua no muy considerables. Las velocidades durante las crecientes varían entre 1,50 m/s y 3,00 m/s. Durante esta etapa, la energía del río es empleada tanto en el sentido vertical como en el sentido horizontal, para abrir y profundizar el cauce. Pueden encontrarse áreas de inundación y depósitos laterales de acreción o barras. La forma del cauce puede presentar diferentes tipos de configuraciones.

La erosión del fondo del cauce durante las avenidas en las corrientes maduras es momentánea, debido a que cuando disminuye la velocidad del agua, recupera de nuevo los sedimentos. Los procesos de socavación, transporte y resedimentación ayudan al control del comportamiento del río. Durante esta etapa ya hay un verdadero régimen fluvial, el caudal es alto inclusive en temporadas de estiaje, y las crecientes importantes ocurren cuando las lluvias son prolongadas.

Figura 19. **Sección transversal de un río de piedemonte**



Fuente: OCHOA RUBIO, Tomás. *Hidráulica de ríos y procesos morfológicos*. Ecoe ediciones, 2011. p. 322.

#### 2.1.1.4. **Etapa de vejez (ríos de llanura)**

En esta etapa la corriente entrega su caudal al mar, la pendiente es casi cero y se forman deltas al dividirse en cauces menores. La velocidad disminuye y el río pierde la capacidad de transporte. El fondo de estos cauces es aluvial y la sedimentación es más relevante que la erosión en esta zona. Con respecto a la sección transversal, existe menor tendencia a profundizar, pero hay mayor tendencia a ampliarse. Se presentan planicies de inundación y deltas. El río adquiere carácter distributivo en contraposición de la etapa juvenil, en la cual el comportamiento es contributivo.

Figura 20. **Sección transversal típica de un río de llanura**



Fuente: OCHOA RUBIO, Tomás. *Hidráulica de ríos y procesos morfológicos*. Ecoe ediciones, 2011. p. 322.

### **2.1.2. El curso de los ríos**

Desde un punto de vista hidráulico, el río se considera como un canal, pero el comportamiento de un río es más complejo que la simplificación que se hace en el flujo de canales artificiales. El recorrido de un río no es fijo, sino que puede cambiar en eventos extraordinarios o de forma gradual a lo largo del tiempo. La presencia de vegetación a lo largo de los márgenes de un río contribuye a la definición de su cauce, su ausencia contribuye a la inestabilidad.

El río siempre busca un equilibrio. La dirección de velocidad de un río no es paralela al contorno, sino que presenta desviaciones. En relación a los cambios, el río presenta un grado de libertad relativo a la planta, buscando un cierto equilibrio que se concreta con alguna u otra sinuosidad. El cambio de las secciones del río se debe a variables hidrológicas, hidráulicas y al transporte de material. Con las variables anteriores, el río busca un acomodo con su segundo grado de libertad. Las secciones son más anchas y someras. El tercer grado de libertad es la posición de la superficie libre en el régimen de lámina libre. Estas libertades son las que el río trata de hacer valer cuando se presenta algún tipo de intervención que altere el equilibrio.

### **2.1.3. La rugosidad de un río**

Es importante seleccionar adecuadamente el coeficiente de rugosidad ya que su valor influye en el comportamiento del modelo que se está analizando.



“Existen gran cantidad de tablas que determinan los valores del coeficiente de rugosidad de Manning, pero es importante identificar los factores que la afectan. Entre estos están”<sup>10</sup>:

- Tipo de material en el fondo del cauce: cuando el tamaño de las partículas del fondo del cauce es grande, la rugosidad es mayor.
- Irregularidad: la irregularidad en el fondo del cauce aumenta la turbulencia y la rugosidad.
- Variación de las secciones transversales: los cambios de sección a lo largo del río actúan como retardantes del flujo y esto se debe tomar en consideración al momento de determinar la rugosidad.
- Obstrucciones: contribuyen como retardantes del flujo. Un ejemplo de esto, son los troncos de los árboles.
- Vegetación: produce rugosidad y retarda también el flujo. Debido a esto, Manning toma muy en cuenta este factor.
- Meandros y trenzas: entre mayor cantidad de estos se encuentren en el cauce, el retraso del flujo es mayor. Los canales cuando son rectos generan mayores velocidades.

#### **2.1.4. Las avenidas**

La avenida es el fenómeno natural de la crecida de un río. Las avenidas son corrientes de agua de gran magnitud que ocurren a causa de una tormenta. Ponen a prueba la estabilidad de los cauces, provocan las mayores erosiones, causan inundaciones, etc. El tránsito de la avenida en el cauce del río se refiere a la manera en que esta viaja aguas abajo. Las avenidas extraordinarias pueden transformar el curso o la naturaleza de un río. En esta parte es donde el presente

---

<sup>10</sup> SUÁREZ DÍAZ, Jaime. *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2001. p. 91.

trabajo de graduación se enfoca en cuanto a la modelación de avenidas en régimen permanente.

En las avenidas se toma en cuenta en primer lugar el caudal máximo instantáneo  $Q$ , mayor que el medio diario correspondiente. Esos valores obtenidos son extraños en la curva de caudales clasificados porque no tienen el mismo significado. Al incluir los caudales máximos que se dan en estos fenómenos, implicaría que estos se producen esencialmente. Con los valores máximos instantáneos de cada año, se puede formar una secuencia que se estudia bajo la estadística para caracterizar la probabilidad de ocurrencia. El caudal  $Q$  posee un periodo de retorno  $T_r$  si la probabilidad de ser superado en un año es de  $1/T_r$ .

#### **2.1.5. Régimen de un río**

El régimen de un río se refiere a la distribución de los caudales medios mensuales a lo largo de un año. Los ríos tienen un régimen hidrológico determinado debido a las características de la cuenca y a la precipitación. La pendiente de un río establece la diferencia más destacable de un régimen hidráulico.

“El régimen de un río se clasifica según el Número de Froude,  $NF$ , el cual es una relación adimensional entre las fuerzas de inercia y las de gravedad”<sup>11</sup>. En el régimen supercrítico ( $NF > 1$ ) el flujo tiene alta velocidad, la cual es propia de los ríos de montaña o los ríos que poseen pendiente alta. El flujo subcrítico ( $NF < 1$ ) corresponde a un régimen de llanura con baja velocidad. Por último, el

---

<sup>11</sup> SUÁREZ DÍAZ, Jaime. *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2001. p. 90.

flujo crítico ( $NF = 1$ ) es un estado teórico en corrientes naturales y representa el punto de transición entre los regímenes anteriores.

#### **2.1.5.1. Cauces en régimen torrencial o de montaña**

El régimen torrencial se caracteriza por la velocidad alta que lleva la corriente. El número de Froude en estos cauces es mayor que 1. Los ríos de montaña son los que presentan este régimen. Estos ríos tienen una gran capacidad para el transporte de sedimentos debido a la gran pendiente que presentan. Además, este transporte se alimenta de la erosión del fondo y por los taludes del lugar.

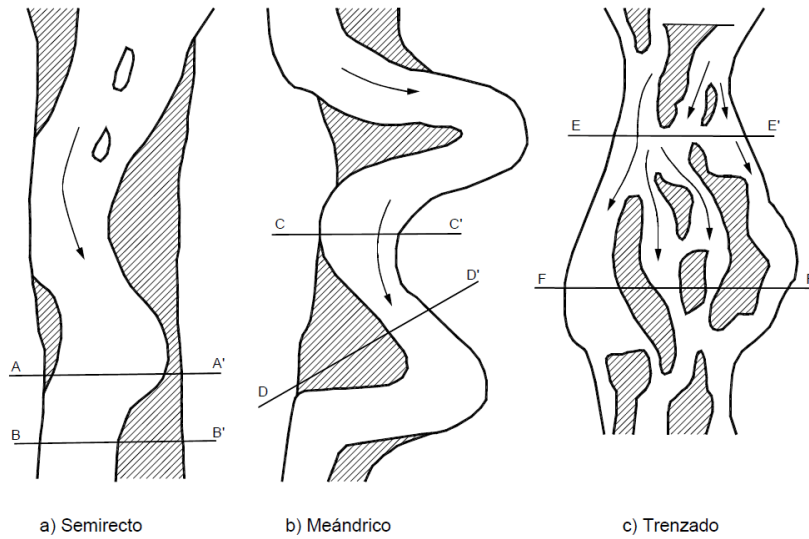
#### **2.1.5.2. Cauces en régimen tranquilo o de llanura**

Cuando la pendiente de un cauce es pequeña el régimen es tranquilo y el número de Froude es subcrítico. La capacidad de transporte de sedimentos es baja y el río empieza a depositar los sedimentos que llevaba. El fenómeno que se presenta en este tipo de cauces es la agradación. Cuando un río recorre un tramo de llanura hay grandes posibilidades de desbordamientos.

#### **2.1.6. Morfología fluvial**

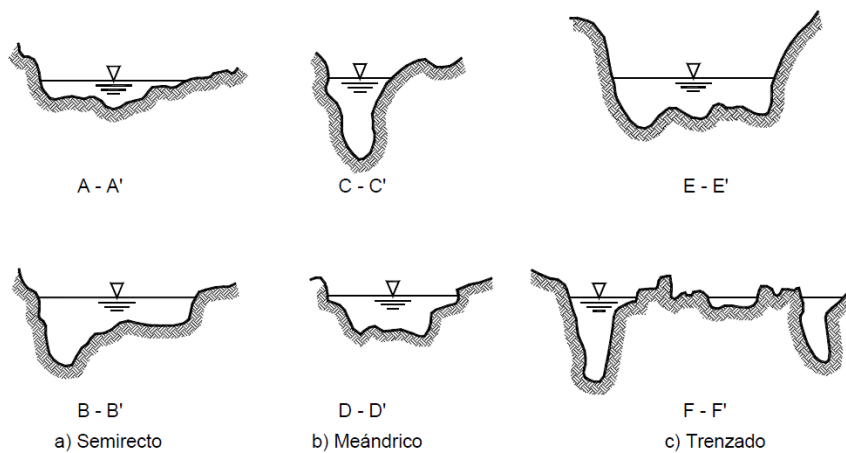
Se encarga de estudiar las diferentes formas que puede presentar un río tanto en su recorrido como en su sección transversal y, de cómo ha llegado a esa forma. Hay cambios fluviales que ocurren violentamente (por causa de la erosión) y existen otros que ocurren gradualmente a lo largo de los años o siglos (como los meandros). Existen tres formas básicas de los cauces: rectos, meándricos y trenzados.

Figura 21. Tipos de cauce



Fuente: SUÁREZ DÍAZ, Jaime. *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2001. p. 101.

Figura 22. Formas del cauce



Fuente: SUÁREZ DÍAZ, Jaime. *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2001. p. 101.

El estudio de los cambios que sufren los ríos es de vital importancia para el diseño hidráulico. Son muchos factores que se toman en cuenta para el estudio del desarrollo y evolución de los ríos. El comportamiento de los ríos depende de la topografía relacionada a las condiciones geológicas. El desarrollo de las formas que adopta un río es diferente en una zona plana que en una zona que presenta mayor pendiente.

La ocurrencia de caudales extremos influye fuertemente en la morfología del río. Además, uno de los factores que deben ser tomados con mayor atención es el de la intervención humana en los ríos. La construcción de diversas obras hidráulicas altera fuertemente el flujo del agua. Por ello debe evaluarse adecuadamente el impacto que la obra podrá generar a la corriente.

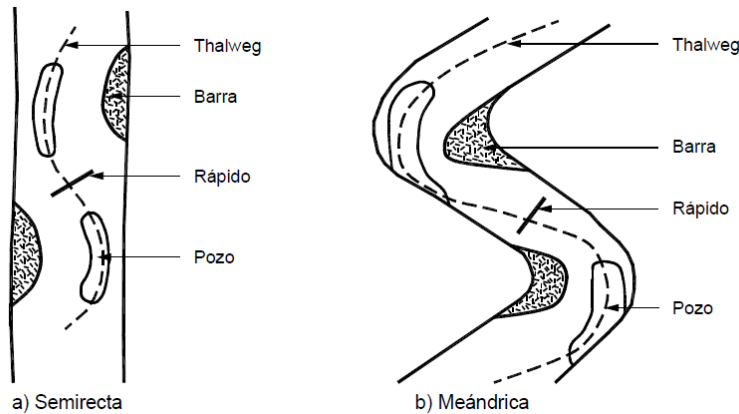
#### **2.1.6.1. Propiedades morfológicas**

Los ríos pueden clasificarse por su forma semirecta, meándrica o trenzada. Una misma corriente puede tener cambios de patrón a lo largo de su tramo y de acuerdo al caudal que transporta en cada época del año. Además, los ríos se clasifican por lecho simple o múltiple y de acuerdo al material granular que se encuentra en el fondo, rocoso o aluvial; cohesivo o granular; homogéneo o heterogéneo.

##### **2.1.6.1.1. Thalweg**

Es la línea central de la corriente en que el cauce es más profundo y posee mayor velocidad. Generalmente tiene una tendencia a divagar de un lado al otro del cauce. Además, trata de tomar la línea exterior en las curvas.

Figura 23. **Posición del thalweg, barras, rápidos y pozos**

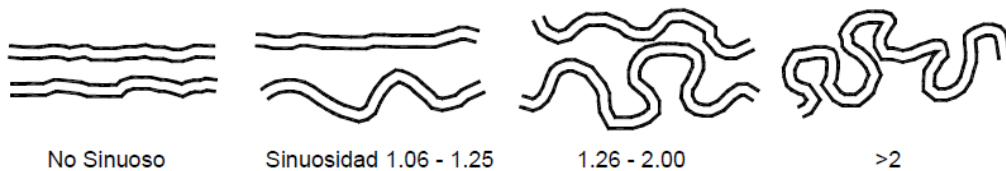


Fuente: SUÁREZ DÍAZ, Jaime. *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2001. p. 102.

### 2.1.6.1.2. Sinuosidad

Se define como la relación entre la longitud total del thalweg en la corriente y la longitud en línea recta. Un río se puede considerar recto si la sinuosidad es menor de 1,1 y se considera meándrico si la relación es mayor a 1,5. Si el valor se encuentra entre 1,1 y 1,5 se dice que el río es sinuoso.

Figura 24. **Sinuosidad de los ríos**



Fuente: SUÁREZ DÍAZ, Jaime. *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2001. p. 104.

### 2.1.6.1.3. Barras

Son depósitos de sedimentos junto a la orilla o dentro del río. Existen diferentes tipos de barras:

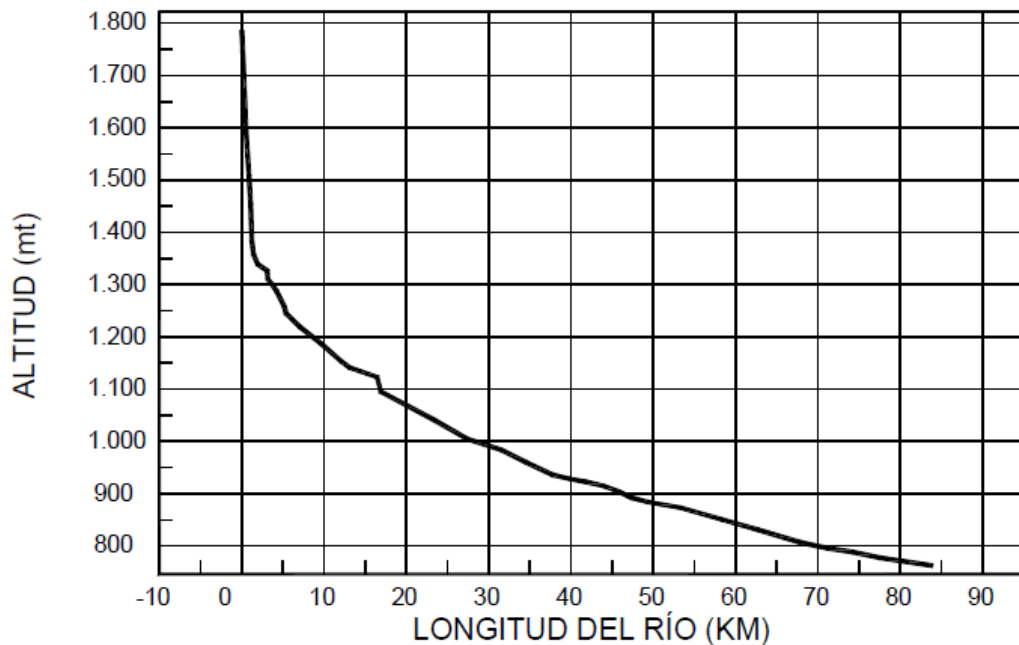
- Laterales: en cauces rectos o sinuosos se forman las barras en la orilla, estas se pueden mover a lo largo del río y migrar. En cauces semirectos cuando se alternan pueden ser precursoras de los procesos de formación de meandros.
- De punta: se forman en las partes internas de las curvas que están bien desarrolladas. Por lo general, aumentan su tamaño cuando la curva se hace más fuerte.
- En uniones: cuando una corriente tributaria se une a un río de menor tamaño se forman barras en la unión tanto aguas arriba como aguas abajo.
- De mitad de canal: se forman en ríos anchos y pueden permanecer por años convirtiéndose en islas.
- De diamante: se encuentran en mitad del canal y son de gran tamaño. Generan anarraficación en el río.
- Diagonales: se localizan de esa manera por corrientes que van en diagonal. Ocurren en canales con fondos de grava.
- En forma de duna: poseen un perfil como de duna y tratan de ser alargadas en dirección transversal del canal.

### 2.1.6.2. Perfil longitudinal del río

El recorrido de un río tiene una tendencia a la sinuosidad por lo cual el eje hidráulico río no es una línea recta. Habitualmente la pendiente es muy alta en su nacimiento y va disminuyendo río abajo.

A medida que se va avanzando aguas abajo y que va cambiando la pendiente, los sedimentos se clasifican a partículas de menor tamaño debido a que el arrastre de la corriente y la velocidad es menor. El cambio de la pendiente del río está ligado con la modificación en los procesos de erosión y la sedimentación.

Figura 25. Perfil longitudinal de un río



Fuente: SUÁREZ DÍAZ, Jaime. *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2001. p. 102.



### 2.1.6.3. Sección transversal del río

La forma de la sección transversal va a depender del lugar, la geometría que tiene en planta y de las características de los sedimentos. En una curva la sección transversal es más profunda en el lado exterior. En los sectores rectos del cauce la forma puede ser trapezoidal o rectangular, pero siempre existe un lugar más profundo en donde se localiza el thalweg.

La forma de la sección transversal puede describirse con los siguientes parámetros: área, ancho, relación ancho – profundidad, profundidad promedio, perímetro mojado, radio hidráulico y capacidad del canal.

### 2.1.7. Clasificación de los ríos

Hay algunos métodos de clasificación de las corrientes, pero no todas aplican para los ríos de todos los países. A continuación, se presenta una clasificación de los ríos que se ha elaborado tomando en cuenta ciertas propiedades que son muy importantes.

Tabla XVI. Clasificación general de las corrientes de agua

Propiedad	Clasificación	Características
Libertad para moverse	Aluvial	Cambia de tamaño y forma de acuerdo al caudal y a los sedimentos.
	No aluvial	Fondo en roca, no puede moverse.
Continuidad del flujo en el tiempo	Perenne	Flujo permanente todo el tiempo.
	Intermitente	En temporadas secas el flujo desaparece.
	Efímero	Solo tiene flujo en el momento de las lluvias.

Continuación de la Tabla XVI.

Relación entre erosión y sedimentación	En degradación	El cauce se está profundizando por erosión.
	En agradación	El cauce se está levantando por sedimentación.
Forma del cauce	Semirecto	Sinuosidad menor a 1,1.
	Sinuoso	Sinuosidad de 1,1 a 1,5.
	Trenzado	Se forman trenzas e islas de depósitos dentro del cauce.
	Anaramificado	Se forman varios canales independientes.
	Torrente	Ríos de alta montaña.
	Delta	Se forman canales dentro de los depósitos en la desembocadura.
	Meándrico	La sinuosidad es mayor que 1,5.

Fuente: SUÁREZ DÍAZ, Jaime. *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2001. p. 106.

## 2.2. Transporte de sedimentos en ríos

“Desde el punto de vista en el estudio de Hidráulica Fluvial, son importantes los procesos de erosión en la corteza terrestre”<sup>12</sup>. Esto se debe a que en el manejo de un río es importante el transporte sólido y este solo se puede comprender, así como controlarse, en función de la erosión de la cuenca. El río es un elemento de drenaje de una cuenca, pero no solo transporta agua sino también materiales sólidos que se originan de la erosión de la cuenca. En general, los lechos de los ríos están compuestos de materiales erosionables.

Entendemos por sedimentos, a los materiales que son más pesados que el agua y que son transportados en algún momento por la corriente para ser

<sup>12</sup> ROCHA FELICES, Arturo. *Introducción a la hidráulica fluvial*. Primera Edición. Perú: Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, 1998. p. 24.

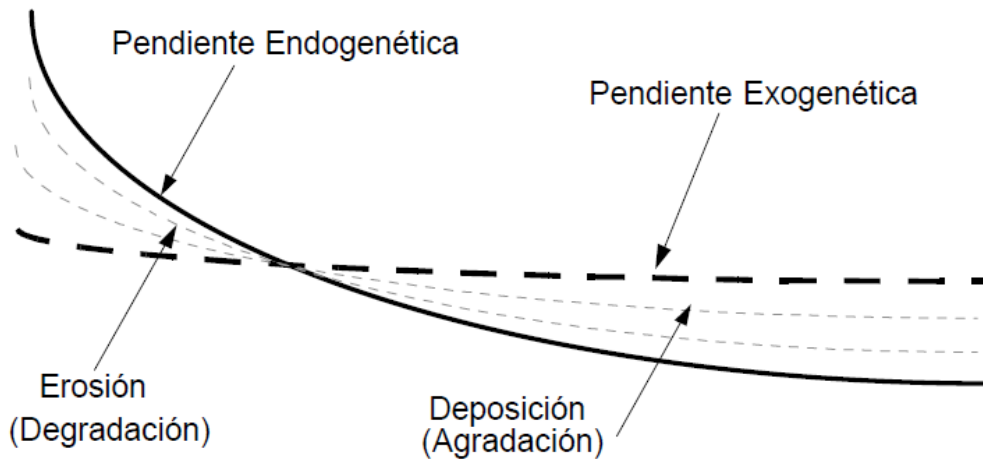
finalmente depositados. Estos están constituidos por materiales no cohesivos, como limos, arenas, gravas y eventualmente piedras. A estos sedimentos se les conoce como sólidos.

Los sedimentos que transporta el flujo son importantes debido a que su volumen puede influir el comportamiento de las estructuras hidráulicas tales como captaciones, desarenadores, sedimentadores, presas de embalse, puentes, conducciones de todo tipo, espolones y protecciones; lo mismo en la rectificación de ríos y la optimización de las condiciones de navegabilidad.

Los sedimentos pueden limitar la vida útil de las obras o puede exigir costosos trabajos de mantenimiento, pero también se asocia a los fenómenos de la abrasión y de la socavación.

El transporte de sedimentos es, por lo tanto, el estudio de los procesos de erosión, inicio del movimiento, transporte, depósito y compactación de las partículas sólidas. Este transporte puede ser clasificado por medio de dos criterios: según el modo de transporte y según el origen del material. Como consecuencia de la erosión, hay una variación de la pendiente original la cual es llamada pendiente endogenética y a la nueva pendiente que se forma, pendiente exogenética.

Figura 26. **Variación de pendientes durante la erosión**



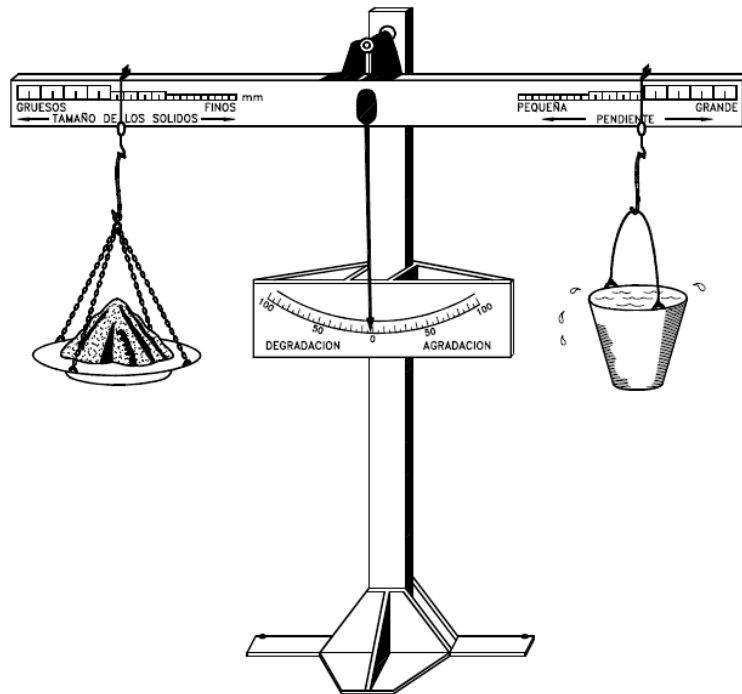
Fuente: ROCHA FELICES, Arturo. *Introducción a la Hidráulica Fluvial*. Primera edición. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería, 1998. p. 25.

El movimiento de los sólidos en los cauces fluviales es un proceso intermitente. El material es transportado hasta un punto donde es depositado. Además, el agua es el agente de erosión más importante debido a que no solo transporta elementos sólidos, sino que también sustancias químicas que contribuyen a este proceso.

La cantidad de sólidos resultante por la erosión se expresa en términos de volumen o peso por unidad de área de la cuenca y por unidad de tiempo. Este valor es conocido como Erosión Específica. El estudio de transporte de sedimentos nos permite realizar un modelo del material sólido en cuestión para que se ajuste al comportamiento real.

Para la apreciación de la erosión y la sedimentación es muy útil analizar la Relación de Lane, propuesta por este autor en el año 1955.<sup>13</sup> Esta es una relación de cuatro variables. Las variables son el gasto sólido de fondo  $T_F$ , el caudal  $Q$ , la pendiente  $S$  y el diámetro característico del material sólido del fondo  $d$ . La relación implica que el cambio en una de las variables repercute en un cambio de una o más de las otras variables para recuperar el balance.

Figura 27. **Balanza de Lane**



Fuente: ROCHA FELICES, Arturo. *Introducción a la Hidráulica Fluvial*. Primera edición. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería, 1998. 207 p.

<sup>13</sup> ROCHA FELICES, Arturo. *Introducción a la hidráulica fluvial*. Primera Edición. Perú: Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, 1998. p. 206.

### **2.3. Control de inundaciones**

Las inundaciones se generan cuando una zona terrestre queda cubierta de agua momentáneamente debido al desbordamiento de los ríos, lo cual provoca muchos daños en los lugares aledaños. Cuando los caudales son altos, sucede con frecuencia que superan la capacidad de conducción del cauce principal del río y las aguas se desbordan.

Los ríos deben ser estudiados tanto como aportadores de beneficios como de riesgos. Los daños que puede generar una inundación, tanto por la elevación que llega alcanzar el agua como las velocidades que puede tener, son los siguientes:

- Pérdidas de vidas humanas.
- Pérdidas de ganado y de animales en general.
- Destrucción de cultivos.
- Deterioro y destrucción de diversos objetos y obras civiles.
- Interrupción y destrucción de vías de comunicación.
- Interrupción de servicios eléctricos, telefónicos, de agua potable y drenaje.
- Propagación de enfermedades.

Para poder evitar o reducir las inundaciones, así como los efectos perjudiciales, se pueden tomar dos clases de acciones:

- Acciones estructurales: obras hidráulicas y fluviales para el manejo y control de las avenidas.
- Acciones no estructurales o predictivas: avisos y alertas a la población que puede ser afectada.

Las acciones estructurales que existen para evitar las inundaciones deben ser planeadas y diseñadas cuidadosamente. Cuando una región se empieza a poblar y desarrollar se debe disponer de un plano de llanura de inundación, en la cual se limite la zona inundada por una avenida que tenga un periodo de retorno de 100 años, con el fin de proveer información para el futuro desarrollo, uso de la tierra y otras regulaciones. Estos mapas son importantes para examinar las diferentes medidas estructurales y no estructurales que pueden llegar a tomarse.

El diseño apropiado de las obras para los cauces naturales dependerá de los resultados de los estudios hidrológicos y geomorfológicos. La importancia de estos estudios radica en los datos que proporciona: pronósticos de la probabilidad de ocurrencia de la precipitación y estimaciones sobre las magnitudes de los caudales medios, mínimos y de creciente; niveles mínimos, máximos y medios; posibles zonas de inundación, velocidades del flujo; capacidad para transportar sedimentos; socavación; erosión y posibles desbordes en el cauce.

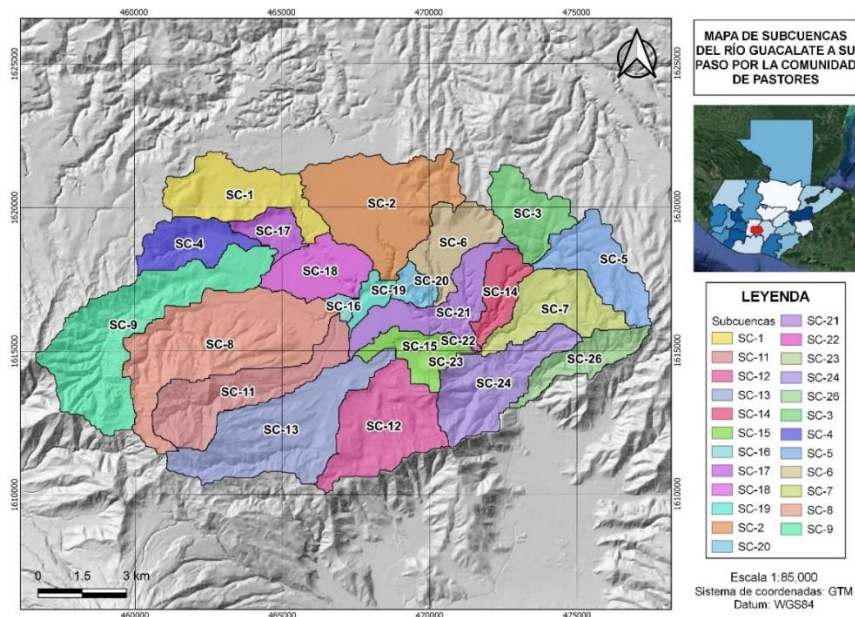




### 3. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA Y MODELACIÓN HIDRÁULICA

La cuenca de análisis del río Guacalate se delimitó hasta un punto de control que estuviera cercano a la comunidad de Pastores. Esta cuenca que se dividió en 24 subcuencas con el propósito de obtener un modelo hidrológico más representativo. El modelo hidrológico se construye con el fin de obtener los caudales máximos para diferentes periodos de retorno, los cuales se utilizan para realizar la modelación hidráulica y así, obtener las áreas de inundación en la comunidad de Pastores, debido a los antecedentes que tiene esta región.

Figura 28. Identificación de las subcuencas del río Guacalate



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 3.14.15, por medio de sistemas de información geográfica.

### 3.1. Parámetros geomorfológicos de la cuenca

La geomorfología permite el estudio de las formas superficiales del relieve terrestre con el fin de conocer la naturaleza y comportamiento de la cuenca. Se determinó el área, la longitud del cauce principal y la pendiente media de cada subcuenca para poder construir el modelo hidrológico. Los siguientes parámetros se obtuvieron a partir de un modelo de elevación digital del terreno (DEM):

- Área: es la proyección horizontal de la superficie de drenaje. Está delimitada por la divisoria de aguas de la zona de estudio. Generalmente se reporta en kilómetros cuadrados.
- Longitud del cauce: se refiere a la longitud del cauce que atraviesa a la subcuenca desde el punto más lejano hasta el punto de salida.
- Pendiente media del terreno: es el valor medio de la inclinación del terreno respecto a la horizontal.

Tabla XVII. Parámetros geomorfológicos de cada subcuenca

No.	Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	L <sub>c</sub> (km)	S <sub>media</sub> (%)
1	SC-1	8,85	5,37	15,79
2	SC-2	14,78	3,04	12,03
3	SC-3	5,62	1,50	23,35
4	SC-4	4,98	1,73	24,14
5	SC-5	6,77	2,08	30,79
6	SC-6	5,64	0,90	24,92
7	SC-7	7,49	2,38	33,96
8	SC-8	18,85	7,47	32,31
9	SC-9	17,77	9,78	43,60
10	SC-11	9,84	7,01	36,38
11	SC-12	11,01	3,53	28,20
12	SC-13	15,03	6,94	30,32
13	SC-14	3,51	3,88	27,11

Continuación de la Tabla XVII.

No.	Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	L <sub>c</sub> (km)	S <sub>media</sub> (%)
14	SC-15	4,01	3,44	35,05
15	SC-16	0,63	0,93	18,98
16	SC-17	2,51	2,11	18,45
17	SC-18	5,79	3,10	8,88
18	SC-19	1,41	1,69	19,47
19	SC-20	1,61	2,55	37,79
20	SC-21	6,95	2,38	21,62
21	SC-22	0,07	0,38	30,05
22	SC-23	0,09	0,09	45,56
23	SC-24	9,17	2,56	45,82
24	SC-26	4,36	0,26	55,80

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, utilizando un modelo de elevación digital del terreno.

### 3.2. Método del número de curva (CN)

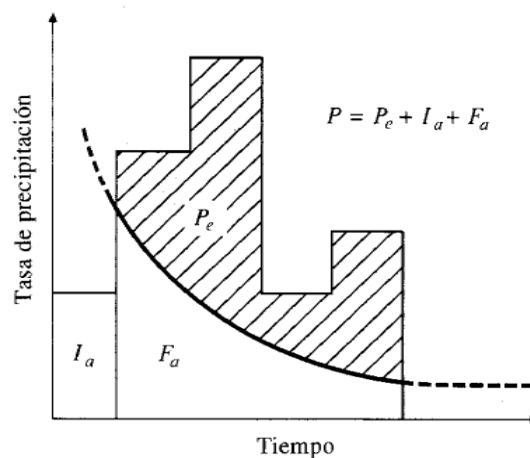
“Es un método que el Soil Conservation Service (SCS) desarrolló para calcular las abstracciones de la precipitación de una tormenta”<sup>14</sup>. Las pérdidas o abstracciones son principalmente agua absorbida por infiltración con algo de intercepción y almacenamiento superficial, es decir, agua que no formará parte de la escorrentía directa.

El número de curva permite representar el porcentaje de lluvia que se transformará en escorrentía directa en función del uso del suelo y del tipo de suelo de la cuenca de estudio. Esta metodología es la más empleada para transformar la precipitación total en precipitación efectiva.

<sup>14</sup> CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David R.; MAYS, Larry W. *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill, 1994. p. 150.

Para la tormenta como un todo, la altura de la precipitación efectiva  $P_e$  es siempre menor o igual a la profundidad de la precipitación total  $P$ . Luego de que la escorrentía inicie, la profundidad inicial del agua retenida por la cuenca  $F_a$  es menor o igual a alguna retención potencial máxima  $S$ . Hay una cierta cantidad de precipitación  $I_a$  (abstracción inicial antes del encharcamiento) para la cual no ocurrirá escorrentía.

Figura 29. **Variables en el método de abstracciones de precipitación del SCS**



Fuente: CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David R.; MAYS, Larry W. *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill, 1994. p. 151.

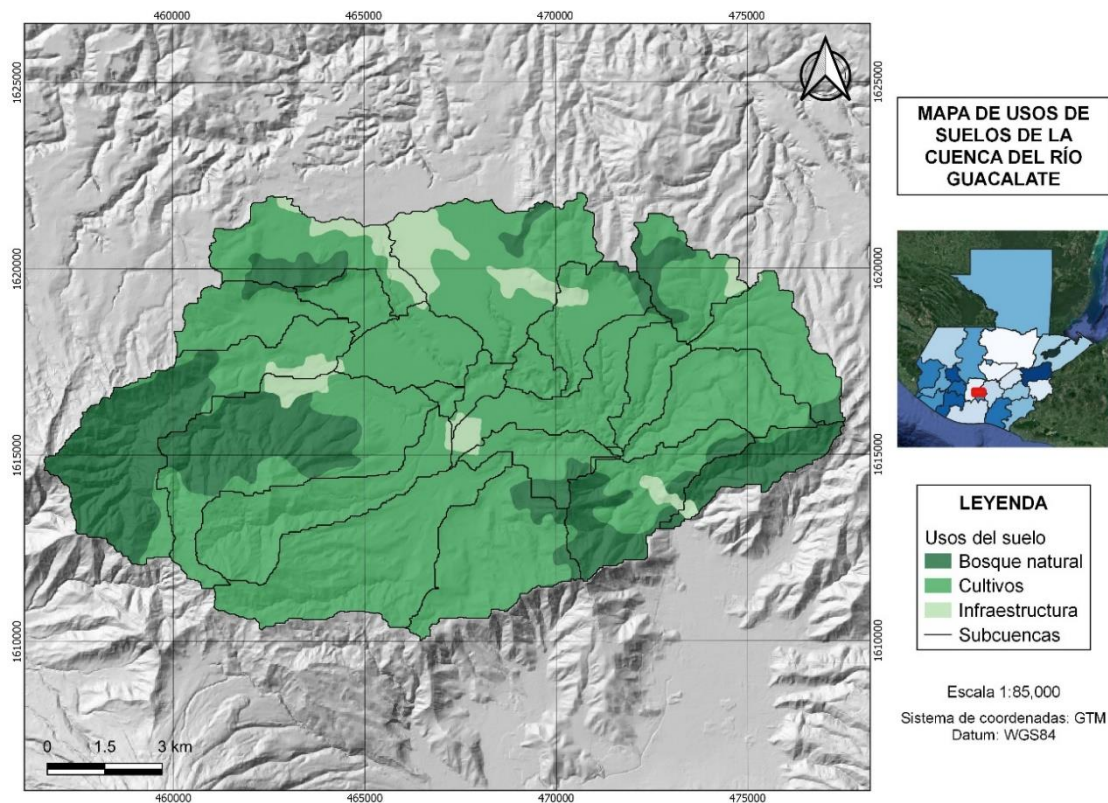
La representación gráfica de estos valores permitió obtener una familia de curvas que fueron estandarizadas a partir de un valor adimensional de curva CN, tal que  $0 \leq CN \leq 100$  dependiendo del grado de escurrimiento directo. Por lo tanto, si el valor de CN es igual a 100, indica que toda la lluvia escurre por ser una superficie impermeable; un valor de CN menor a 100, indica que las superficies son naturales.

El número de curva y S (en pulgadas) se relacionan por:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

Para determinar el valor de CN que corresponde a cada subcuenca, se realizó una intersección entre los mapas de usos del suelo y tipos de suelo que se muestran a continuación.

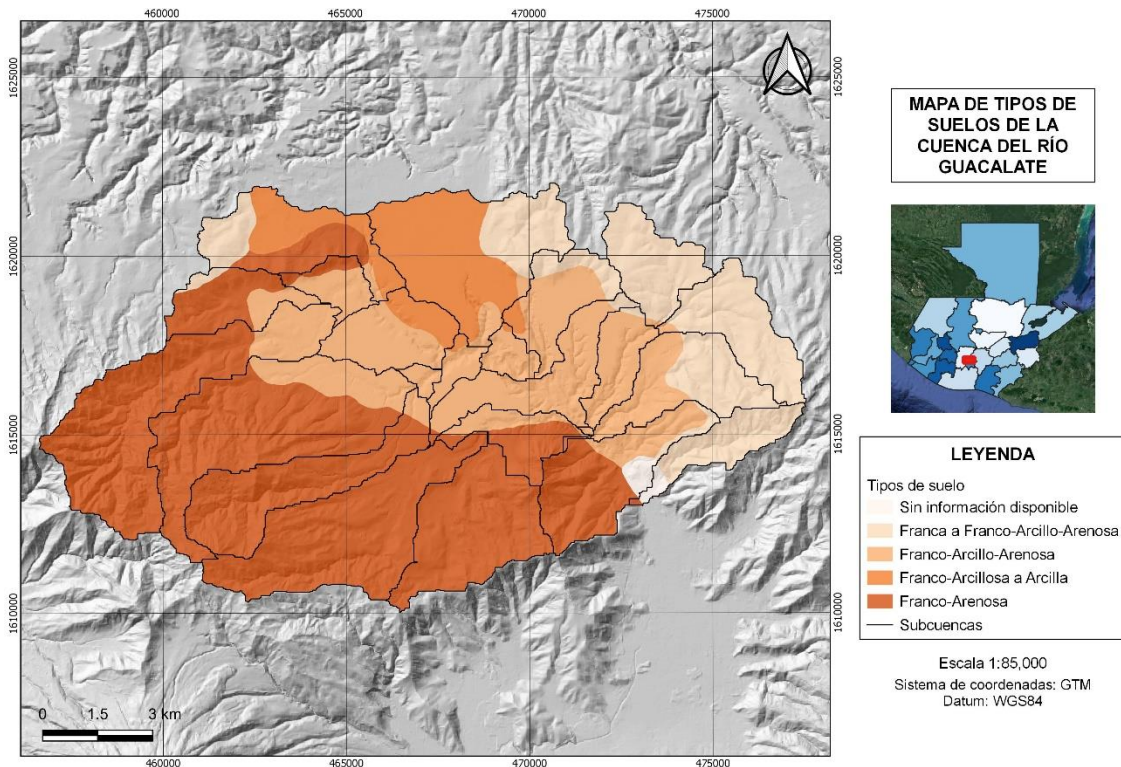
Figura 30. Usos del suelo en la cuenca del río Guacalate



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 3.14.15, por medio de sistemas de información geográfica.

En el mapa de la cuenca se observa que hay tres tipos de usos del suelo. Para el análisis se dividen los usos en áreas permeables y en las áreas impermeables. Estas últimas se manejaron como un porcentaje en relación al área total de cada subcuenca. El uso de bosque natural y cultivos está considerado entre las áreas permeables, mientras que la infraestructura está dentro del grupo de áreas impermeables.

Figura 31. Tipos de suelo en la cuenca del río Guacalate



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 3.14.15, por medio de sistemas de información geográfica.

En el mapa anterior hay un pequeño sector en donde no hay información disponible, por lo tanto, se tomó el tipo de suelo más crítico para el análisis, dado

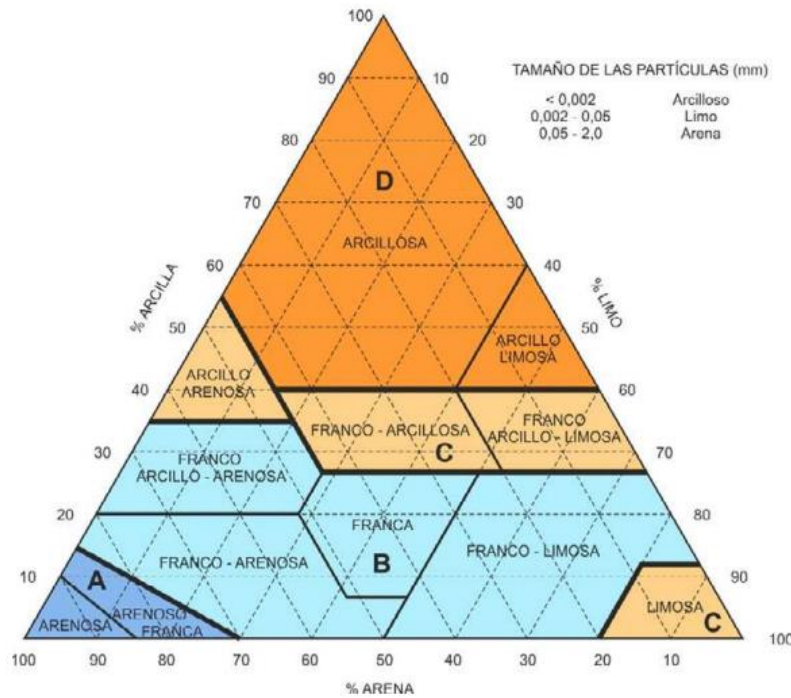
que la modelación se enfoca en la determinación de caudales máximos, un suelo menos permeable proveerá valores de caudales más altos como factor de seguridad. Además, para la clasificación de tipos de suelo se utilizó el diagrama triangular para determinar la textura de los suelos que están presentes dentro de la cuenca delimitada.

En este diagrama triangular se distinguen cuatro grupos de suelo:

- Grupo A: en esta clasificación hay arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.
- Grupo B: se localizan suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.
- Grupo C: se halla margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcilla.
- Grupo D: se encuentran suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.



Figura 32. **Diagrama triangular para determinación de la textura en materiales tipo suelo**



Fuente: ORDEN, FOM. 298/2016, de 15 de febrero, por la que se aprueba la norma 5.2-IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras. Ministerio de Fomento. Boletín Oficial del Estado. Madrid, revisión de, 2016.

Los valores de CN para los diferentes usos de suelo en los tipos de suelo mencionados se pueden encontrar en la siguiente tabla en donde podemos seleccionar el CN según la descripción del uso del suelo y el grupo hidrológico del suelo con base a las descripciones de los mapas y diagramas anteriores.



Tabla XVIII. **Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana**

Descripción del uso de la tierra	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada: sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres	68	79	86	89
condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas	45	66	77	83
cubierta buena	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.				
óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75 % o más	39	61	74	80
condiciones aceptables: cubierta de pasto en 50 al 75 %	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85 % impermeables)	89	92	94	95
Distritos industriales (72 % impermeables)	81	88	91	93
Residencial:				
Tamaño promedio del lote				
% promedio impermeable				
1/8 acre o menos	65	77	85	90
1/4 acre	38	61	75	83
1/3 acre	30	57	72	81
1/2 acre	25	54	70	80
1 acre	20	51	68	79
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc.	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados	98	98	98	98
Grava	76	85	89	91
Tierra	72	82	87	89

Fuente: CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David R.; MAYS, Larry W. *Hidrología aplicada*.

Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill, 1994. p. 154.

Para la cuenca que se analizó que está compuesta de varios tipos de suelos y con diferentes usos de la tierra, se puede calcular un CN compuesto como se muestra a continuación:

Tabla XIX. **Número de curva de la subcuenca uno**

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W	
1	SC-1	Bosque	1,81	0,20	C	70	0,03	1,94	
		Bosque		0,15	B	55	0,02	1,13	
		Bosque		1,46	B	55	0,20	11,07	
		Cultivos	5,44	2,11	C	88	0,29	25,62	
		Cultivos		1,92	B	81	0,27	21,50	
		Cultivos		1,14	B	81	0,16	12,79	
		Cultivos		0,26	B	81	0,04	2,92	
			Total	7,24				<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>76,97</b>
			<b>Uso</b>	<b>Área Total</b>	<b>W</b>				
			Infraestructura	1,61	<b>0,18</b>				

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.

Tabla XX. **Número de curva de la subcuenca dos**

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W	
2	SC-2	Bosque	0,61	0,56	B	55	0,05	2,75	
		Bosque		0,05	C	70	0,00	0,28	
		Cultivos	10,66	3,41	B	81	0,30	24,52	
		Cultivos		6,53	C	88	0,58	51,03	
		Cultivos		0,71	B	81	0,06	5,13	
			Total	11,27				<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>83,71</b>
			<b>Uso</b>	<b>Área</b>	<b>W</b>				
			Infraestructura	3,52	<b>0,24</b>				

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.

Tabla XXI. **Número de curva de la subcuenca tres**

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W
3	SC-3	Bosque	1,51	1,51	B	55	0,29	15,76
		Cultivos	3,75	3,75	B	81	0,71	57,79
			Total	5,26			<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>73,55</b>
		<b>Uso</b>	<b>Área</b>	<b>W</b>				
	Infraestructura	0,36	<b>0,06</b>					

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.

Tabla XXII. **Número de curva de la subcuenca cuatro**

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W
4	SC-4	Bosque	0,31	0,31	B	55	0,06	3,45
		Cultivos	4,67	4,67	B	81	0,94	75,92
			Total	4,98			<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>79,37</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.

Tabla XXIII. **Número de curva de la subcuenca cinco**

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W
5	SC-5	Bosque	0,47	0,47	B	55	0,07	3,83
		Cultivos	6,28	6,28	B	81	0,93	75,36
			Total	6,75			<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>79,19</b>
		<b>Uso</b>	<b>Área</b>	<b>W</b>				
	Infraestructura	0,02	<b>0,004</b>					

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.

Tabla XXIV. **Número de curva de la subcuenca seis**

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W
6	SC-6	Bosque	0,45	0,45	B	55	0,09	4,75
		Cultivos	4,80	1,04	B	81	0,20	16,10
		Cultivos		0,30	C	88	0,06	5,09
		Cultivos		0,08	C	88	0,01	1,31
		Cultivos		3,04	B	81	0,58	46,81
		Cultivos		0,34	B	81	0,06	5,20
		Total		5,26			<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>79,26</b>
<b>Uso</b>	<b>Área</b>	<b>W</b>						
	Infraestructura	0,38	<b>0,07</b>					

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.

Tabla XXV. **Número de curva de la subcuenca siete**

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W
7	SC-7	Bosque	0,09	0,09	B	55	0,01	0,67
		Cultivos	7,40	7,40	B	81	0,99	80,01
		Total		7,49			<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>80,68</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.

Tabla XXVI. **Número de curva de la subcuenca ocho**

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W
8	SC-8	Bosque	9,13	9,13	B	55	0,51	27,97
		Cultivos	8,83	8,83	B	81	0,49	39,81
		Total		17,96			<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>67,78</b>
		<b>Uso</b>	<b>Área</b>	<b>W</b>				
	Infraestructura	0,89	<b>0,05</b>					

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.

Tabla XXVII. Número de curva de la subcuenca nueve

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W
9	SC-9	Bosque	11,98	11,98	B	55	0,70	38,56
		Cultivos	5,11	5,11	B	81	0,30	24,21
			Total	17,09			<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>62,77</b>
		<b>Uso</b>	<b>Área</b>	<b>W</b>				
		Infraestructura	0,69	<b>0,04</b>				

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.

Tabla XXVIII. Número de curva de la subcuenca once

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W
10	SC-11	Bosque	0,004	0,00	B	55	0,0004	0,02
		Cultivos	9,72	9,72	B	81	1,00	80,97
			Total	9,73			<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>80,99</b>
		<b>Uso</b>	<b>Área</b>	<b>W</b>				
		Infraestructura	0,121618	<b>0,01</b>				

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.

Tabla XXIX. Número de curva de la subcuenca doce

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W
11	SC-12	Bosque	1,22	1,22	B	55	0,11	6,11
		Cultivos	9,79	9,79	B	81	0,89	72,00
			Total	11,01			<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>78,11</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.

Tabla XXX. **Número de curva de la subcuenca trece**

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W
12	SC-13	Cultivos	15,04	15,04	B	81	1,00	81,00
			Total	15,04			<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>81,00</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.

Tabla XXXI. **Número de curva de la subcuenca catorce**

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W
13	SC-14	Bosque	0,0014	0,0014	B	55	0,00	0,02
		Cultivos	3,51	3,51	B	81	1,00	80,97
			Total	3,51			<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>80,99</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.

Tabla XXXII. **Número de curva de la subcuenca quince**

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W
14	SC-15	Bosque	0,89	0,89	B	55	0,22	12,34
		Cultivos	3,07	3,07	B	81	0,78	62,82
			Total	3,96			<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>75,16</b>
		<b>Uso</b>	<b>Área</b>	<b>W</b>				
		Infraestructura	0,06	<b>0,01</b>				

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.

Tabla XXXIII. **Número de curva de la subcuenca dieciséis**

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W
15	SC-16	Cultivos	0,63	0,63	B	81	1,00	81,00
			Total	0,63			<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>81,00</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.

Tabla XXXIV. **Número de curva de la subcuenca diecisiete**

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W
16	SC-17	Bosque	0,13	0,13	B	55	0,05	2,74
		Cultivos	2,39	2,39	B	81	0,95	76,96
			Total	2,51			<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>79,70</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.

Tabla XXXV. **Número de curva de la subcuenca dieciocho**

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W	
17	SC-18	Cultivos	5,68	4,08	B	81	0,72	58,17	
		Cultivos		1,60	C	88	0,28	24,80	
			Total	5,68			<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>82,97</b>	
			<b>Uso</b>	<b>Área</b>	<b>W</b>				
			Infraestructura	0,11	<b>0,02</b>				

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.

Tabla XXXVI. **Número de curva de la subcuenca diecinueve**

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W	
18	SC-19	Cultivos	1,31	1,15	B	81	0,88	71,23	
		Cultivos		0,16	C	88	0,12	10,62	
			Total	1,31			<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>81,84</b>	
		<b>Uso</b>	<b>Área</b>	<b>W</b>					
		Infraestructura	0,10	<b>0,07</b>					

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.

Tabla XXXVII. **Número de curva de la subcuenca veinte**

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W
19	SC-20	Cultivos	1,61	1,56	B	81	0,97	78,23
				0,06	C	88	0,03	3,01
			Total	1,61			<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>81,24</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.

Tabla XXXVIII. **Número de curva de la subcuenca veintiuno**

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W	
20	SC-21	Bosque	0,0758	0,08	B	55	0,01	0,65	
		Cultivos	6,304657	6,30	B	81	0,99	80,04	
			Total	6,38			<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>80,69</b>	
		<b>Uso</b>	<b>Área</b>	<b>W</b>					
		Infraestructura	0,57	<b>0,08</b>					

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.



Tabla XXXIX. **Número de curva de la subcuenca veintidós**

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W
21	SC-22	Cultivos	0,07	0,07	B	81	1,00	81,00
			Total	0,07			<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>81,00</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.

Tabla XL. **Número de curva de la subcuenca veintitrés**

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W
22	SC-23	Bosque	0,02	0,02	B	55	0,17	9,53
		Cultivos	0,07	0,07	B	81	0,83	66,97
			Total	0,09			<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>76,49</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.

Tabla XLI. **Número de curva de la subcuenca veinticuatro**

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W
23	SC-24	Bosque	4,51	4,51	B	55	0,52	28,59
		Cultivos	4,17	4,17	B	81	0,48	38,89
			Total	8,68			<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>67,48</b>
			<b>Uso</b>	<b>Área</b>	<b>W</b>			
		Infraestructura	0,49	<b>0,05</b>				

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.

Tabla XLII. **Número de curva de la subcuenca veintiséis**

No.	Nombre	Uso	Área total	Áreas	Grupo	CN <sub>II</sub>	W	CN <sub>II</sub> * W	
24	SC-26	Bosque	3,98	3,98	B	55	0,95	52,16	
		Cultivos	0,22	0,22	B	81	0,05	4,18	
			Total	4,20			<b>CN<sub>II</sub></b>	<b>56,34</b>	
		<b>Uso</b>	<b>Área</b>	<b>W</b>					
		Infraestructura	0,16	<b>0,04</b>					

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base a los mapas de uso de suelo y texturas.

Tabla XLIII. **Resumen de áreas permeables e impermeables**

No.	Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	CN <sub>II</sub> (Áreas permeables)	% impermeable
1	SC-1	8,85	76,97	18,21
2	SC-2	14,78	83,71	23,82
3	SC-3	5,62	73,55	6,45
4	SC-4	4,98	73,55	0
5	SC-5	6,77	79,19	0,36
6	SC-6	5,64	79,26	6,79
7	SC-7	7,49	80,68	0
8	SC-8	18,85	67,78	4,74
9	SC-9	17,77	62,77	3,86
10	SC-11	9,84	80,99	1,23
11	SC-12	11,01	78,11	0
12	SC-13	15,03	81	0
13	SC-14	3,51	80,99	0
14	SC-15	4,01	75,16	1,42
15	SC-16	0,63	81	0
16	SC-17	2,51	79,7	0
17	SC-18	5,79	82,97	1,84
18	SC-19	1,41	81,84	7,01

Continuación de la tabla XLIII.

No.	Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	CN <sub>II</sub> (Áreas permeables)	% impermeable
19	SC-20	1,61	81,24	0
20	SC-21	6,95	80,69	8,23
21	SC-22	0,07	81	0
22	SC-23	0,09	76,49	0
23	SC-24	9,17	67,48	5,3
24	SC-26	4,36	56,34	3,72

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019.

Los números de curva anteriores se aplican para condiciones antecedentes de humedad normales (CN<sub>II</sub>). Para realizar la modelación hidrológica se modificó el valor a una condición de saturación completa (CN<sub>III</sub>) con el fin de modelar una condición crítica. La ecuación utilizada es la siguiente:

$$CN_{III} = \frac{23 \cdot CN_{II}}{10 + 0,13 \cdot CN_{II}}$$

Para hallar la retención potencial máxima se hizo uso del CN<sub>c</sub> para el cálculo del factor de retardancia debido a la presencia de áreas impermeables con la ecuación de áreas impermeables conectadas:

$$CN_c = CN_p + \left( \frac{P_{imp}}{100} \right) (98 - CN_p)$$

Donde:

CN<sub>c</sub> = número de curva de escorrentía compuesto

CN<sub>p</sub> = número de curva de escorrentía anterior

P<sub>imp</sub> = porcentaje de impermeabilidad

Tabla XLIV. **Parámetros de ecuaciones**

No.	Subcuenca	CN <sub>III</sub> (Áreas permeables)	CN <sub>c</sub>	Lc (pies)	S (pulg.)
1	SC-1	88,49	90,22	17620,94	1,08
2	SC-2	92,20	93,58	9964,92	0,69
3	SC-3	86,48	87,22	4907,21	1,47
4	SC-4	86,48	86,48	5680,43	1,56
5	SC-5	89,75	89,78	6819,62	1,14
6	SC-6	89,79	90,34	2965,99	1,07
7	SC-7	90,57	90,57	7795,18	1,04
8	SC-8	82,87	83,59	24492,66	1,96
9	SC-9	79,50	80,21	32082,60	2,47
10	SC-11	90,74	90,83	22979,40	1,01
11	SC-12	89,14	89,14	11578,63	1,22
12	SC-13	90,75	90,75	22763,67	1,02
13	SC-14	90,74	90,74	12739,65	1,02
14	SC-15	87,44	87,59	11277,04	1,42
15	SC-16	90,75	90,75	3059,44	1,02
16	SC-17	90,03	90,03	6907,53	1,11
17	SC-18	91,81	91,92	10167,27	0,88
18	SC-19	91,20	91,68	5543,32	0,91
19	SC-20	90,88	90,88	8348,32	1,00
20	SC-21	90,58	91,19	7803,62	0,97
21	SC-22	90,75	90,75	1257,37	1,02
22	SC-23	88,21	88,21	307,14	1,34
23	SC-24	82,68	83,49	8384,13	1,98
24	SC-26	74,80	75,66	868,72	3,22

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019.

### 3.3. Tiempo de concentración

Se hizo uso de la ecuación del SCS para encontrar el tiempo de concentración. Este tiempo representa teóricamente cuánto le toma a una gota de agua viajar desde el punto más lejano de la cuenca hasta la salida o el punto

de control. Además, se calculó el coeficiente de almacenamiento R como un 60 % del tiempo de concentración.

Los parámetros utilizados para el tiempo de concentración son los siguientes:

$$T_c = \frac{L^{0.8}(S + 1)^{0.7}}{1140 \cdot Y^{0.5}}$$

Donde:

$T_c$  = tiempo de concentración en horas

$L = L_c$  = longitud del cauce principal de la subcuenca en pulgadas

$Y = S_{media}$  = pendiente media del terreno en porcentaje

$S$  = retención potencial máxima en pulgadas =  $\frac{1000}{cn'} - 10$

$cn'$  = factor de retardancia =  $CN_c$

Se ingresaron los siguientes parámetros para el funcionamiento del modelo de la cuenca:

Tabla XLV. **Parámetros para HEC-HMS**

Subcuenca	Área (Km <sup>2</sup> )	CN <sub>III</sub>	% imp.	T <sub>c</sub> (horas)	R (horas)
SC-1	8,85	88	18,21	0,92	0,552
SC-2	14,78	92	23,82	0,576	0,346
SC-3	5,62	86	6,45	0,306	0,184
SC-4	4,98	86	0	0,348	0,209
SC-5	6,77	90	0,36	0,314	0,188
SC-6	5,64	90	6,79	0,175	0,105
SC-7	7,49	91	0	0,322	0,193

Continuación de la tabla XLV.

SC-8	18,85	83	4,74	1,071	0,643
SC-9	17,77	79	3,86	1,277	0,766
SC-11	9,84	91	1,23	0,731	0,439
SC-12	11,01	89	0	0,514	0,309
SC-13	15,03	91	0	0,797	0,478
SC-14	3,51	91	0	0,53	0,318
SC-15	4,01	87	1,42	0,479	0,288
SC-16	0,63	91	0	0,202	0,121
SC-17	2,51	90	0	0,406	0,243
SC-18	5,79	92	1,84	0,735	0,441
SC-19	1,41	91	7,01	0,309	0,185
SC-20	1,61	91	0	0,318	0,191
SC-21	6,95	91	8,23	0,394	0,236
SC-22	0,07	91	0	0,079	0,047
SC-23	0,09	88	0	0,023	0,014
SC-24	9,17	83	5,3	0,383	0,23
SC-26	4,36	75	3,72	0,072	0,043

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019.

### 3.4. Método del bloque alterno

Este método es una forma simple para desarrollar un hietograma de diseño utilizando una curva de intensidad-duración-frecuencia para obtener la precipitación bruta de las subcuencas a tratar. El hietograma de diseño que se produce por medio de este método especifica la profundidad de precipitación que ocurre en  $n$  intervalos de tiempos sucesivos de duración  $\Delta t$  sobre una duración total  $T_d = n \cdot \Delta t$ .

Luego de elegir los periodos de retorno de diseño, la intensidad es leída en una curva IDF para cada una de las duraciones y la profundidad de la precipitación correspondiente se calcula al multiplicar la intensidad y la duración.

El INSIVUMEH proporciona los parámetros de curvas IDF, según el modelo propuesto por Sherman.<sup>15</sup> Para la estación meteorológica Alameda ICTA tenemos el siguiente modelo:

$$I = \frac{1640 \cdot T_r^{0,189}}{(D + 16,74^{0,93})}$$

Donde:

I = intensidad de precipitación en mm/hora

T<sub>r</sub> = periodo de retorno en años

D = duración en minutos

Tabla XLVI. **Precipitación para un periodo de retorno de 10 años**

<b>T<sub>r</sub> = 10 años</b>			
<b>t (min)</b>	<b>I (mm/h)</b>	<b>t (h)</b>	<b>P (mm)</b>
5	144,61	0,08	12,05
15	101,71	0,25	25,43
60	44,75	1,00	44,75
120	26,15	2,00	52,30
180	18,64	3,00	55,93
360	10,19	6,00	61,13
720	5,46	12,00	65,53
1440	2,90	24,00	69,52

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019.

<sup>15</sup> Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). *Curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) para la República de Guatemala.*

Tabla XLVII. **Precipitación para un periodo de retorno de 50 años**

<b>T<sub>r</sub> = 50 años</b>			
<b>t (min)</b>	<b>I (mm/h)</b>	<b>t (h)</b>	<b>P (mm)</b>
5	196,02	0,08	16,33
15	137,87	0,25	34,47
60	60,66	1,00	60,66
120	35,45	2,00	70,89
180	25,27	3,00	75,81
360	13,81	6,00	82,87
720	7,40	12,00	88,82
1440	3,93	24,00	94,24

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019.

Tabla XLVIII. **Precipitación para un periodo de retorno de 100 años**

<b>T<sub>r</sub> = 100 años</b>			
<b>t (min)</b>	<b>I (mm/h)</b>	<b>t (h)</b>	<b>P (mm)</b>
5	223,46	0,08	18,62
15	157,16	0,25	39,29
60	69,15	1,00	69,15
120	40,41	2,00	80,81
180	28,81	3,00	86,43
360	15,74	6,00	94,47
720	8,44	12,00	101,26
1440	4,48	24,00	107,43

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019.



Tabla XLIX. **Precipitación para un periodo de retorno de 200 años**

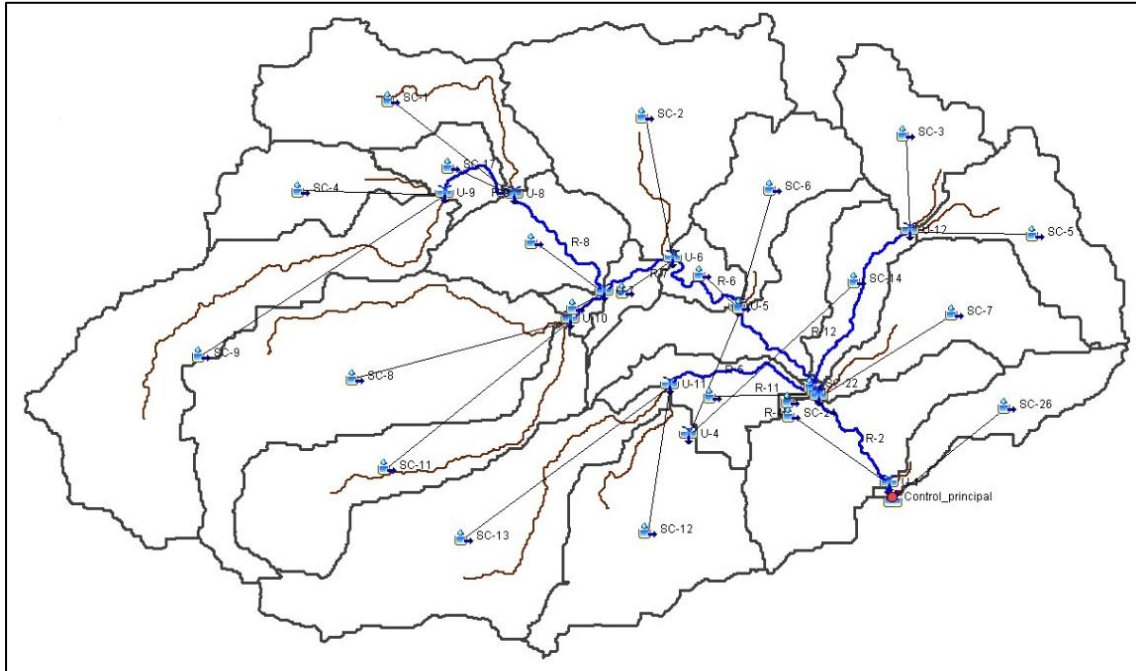
<b>Tr = 200 años</b>			
<b>t (min)</b>	<b>I (mm/h)</b>	<b>t (h)</b>	<b>P (mm)</b>
5	254,73	0,08	21,23
15	179,16	0,25	44,79
60	78,83	1,00	78,83
120	46,06	2,00	92,13
180	32,84	3,00	98,52
360	17,95	6,00	107,69
720	9,62	12,00	115,43
1440	5,10	24,00	122,46

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019.

### **3.5. Modelo hidrológico**

Por medio de los datos calculados previamente, se realizó una modelación hidrológica en el programa de HEC-HMS en donde se escogió como modelo de infiltración el SCS número de curva y como modelo de transformación el hidrograma unitario de Clark.

Figura 33. **Modelo hidrológico de la cuenca Guacalate en HEC-HMS**



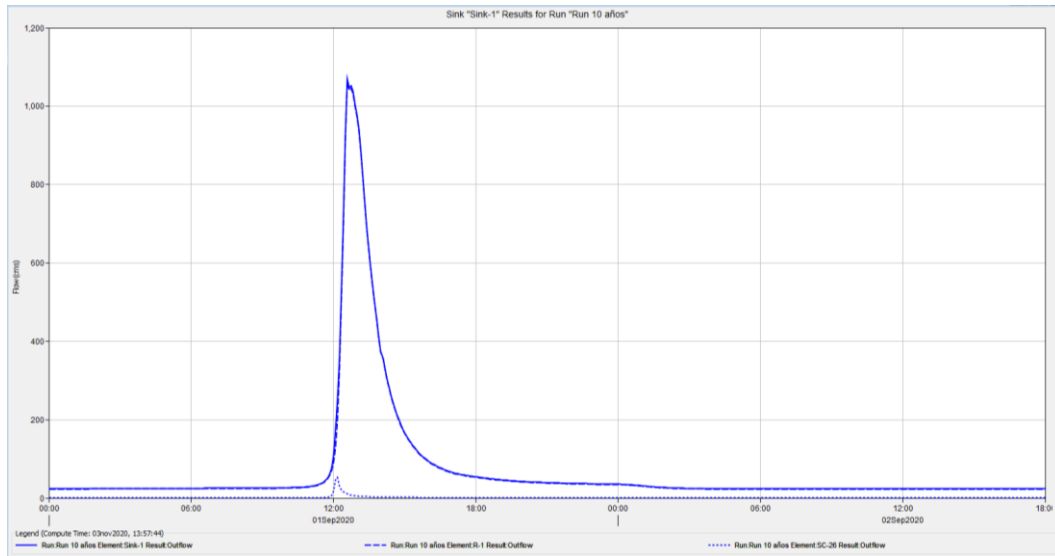
Fuente: elaboración propia, utilizando el programa HEC-HMS 4.4.

Los hidrogramas que se obtienen a la salida de las cuencas, circulan a través de cauces. Se debe aplicar un método que pueda evaluar la propagación y laminación de dichos hidrogramas. Por lo tanto, se hace uso del método de Muskingum Cunge<sup>16</sup> para el modelo hidrológico elaborado.

Los siguientes resultados fueron obtenidos por medio de los datos que se calcularon previamente. Con estos hidrogramas de crecida se puede elaborar la modelación hidráulica.

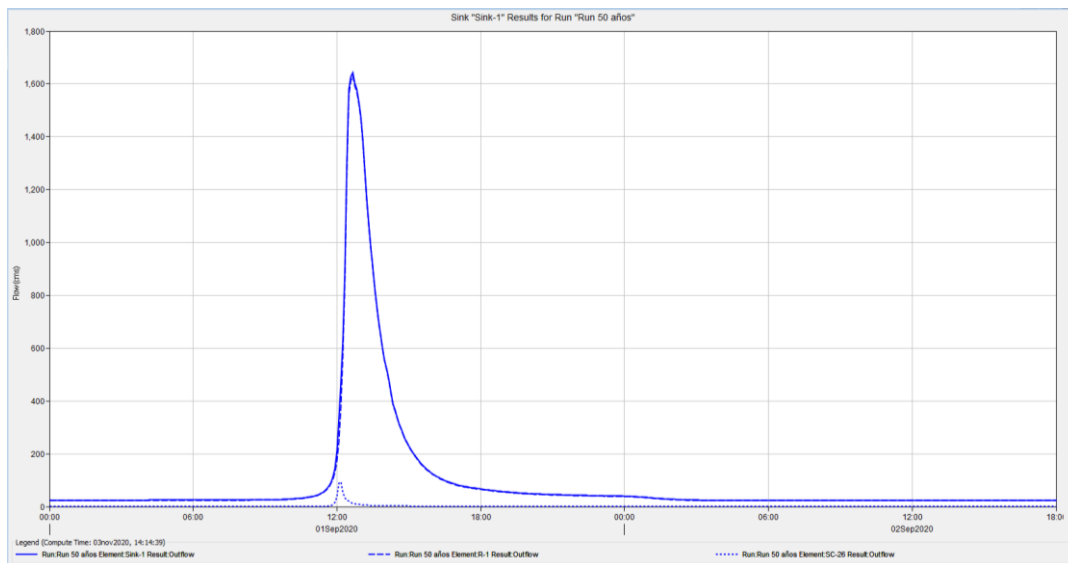
<sup>16</sup> CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David R.; MAYS, Larry W. *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill, 1994. p. 312.

Figura 34. Hidrograma de crecida para un  $T_r = 10$  años



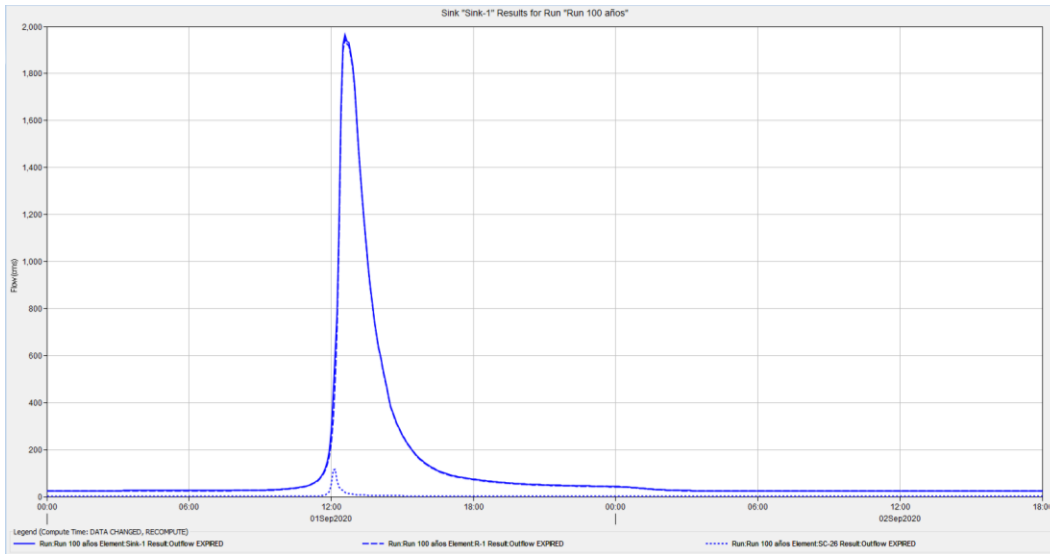
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-HMS 4.4, con base en la modelación hidrológica.

Figura 35. Hidrograma de crecida para un  $T_r = 50$  años



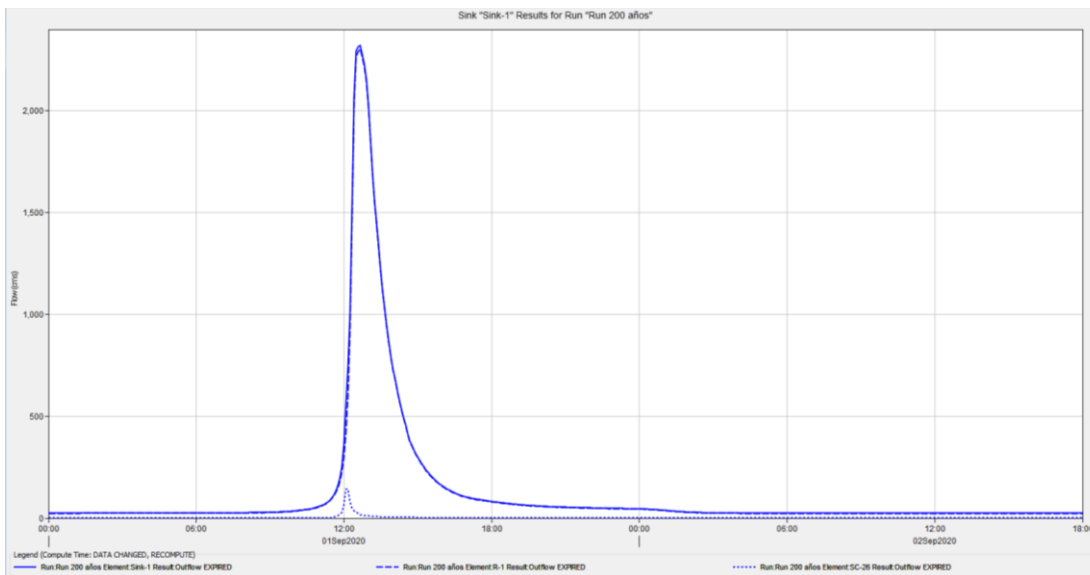
Fuente: elaboración propia, empleando HEC-HMS 4.4, con base en la modelación hidrológica.

Figura 36. Hidrograma de crecida para un  $T_r = 100$  años



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-HMS 4.4, con base en la modelación hidrológica.

Figura 37. Hidrograma de crecida para un  $T_r = 200$  años



Fuente: elaboración propia, empleando HEC-HMS 4.4, con base en la modelación hidrológica.

Tabla L. **Resultados obtenidos en la modelación hidrológica**

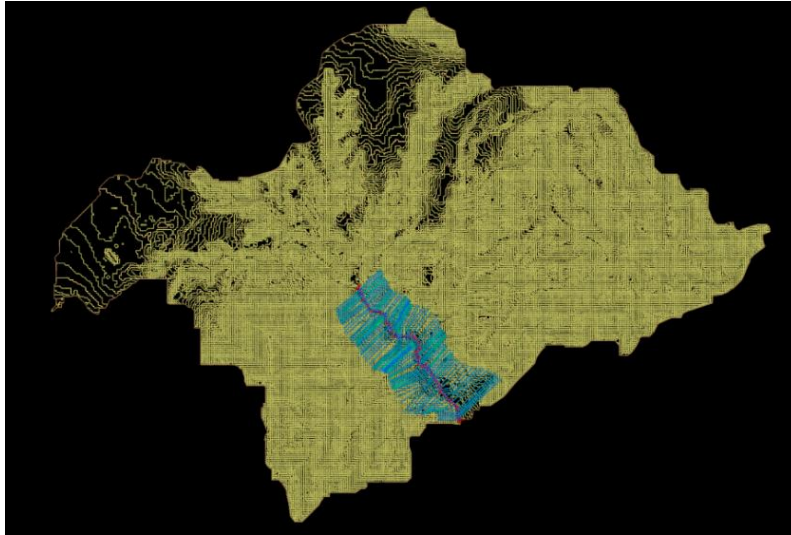
<b>Periodo de retorno</b>	<b>Caudal máximo (m<sup>3</sup>/s)</b>
10 años	1070,99
50 años	1643,07
100 años	1963,89
200 años	2321,94

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con base en la modelación en HEC-HMS 4.4.

### **3.6. Modelo hidráulico**

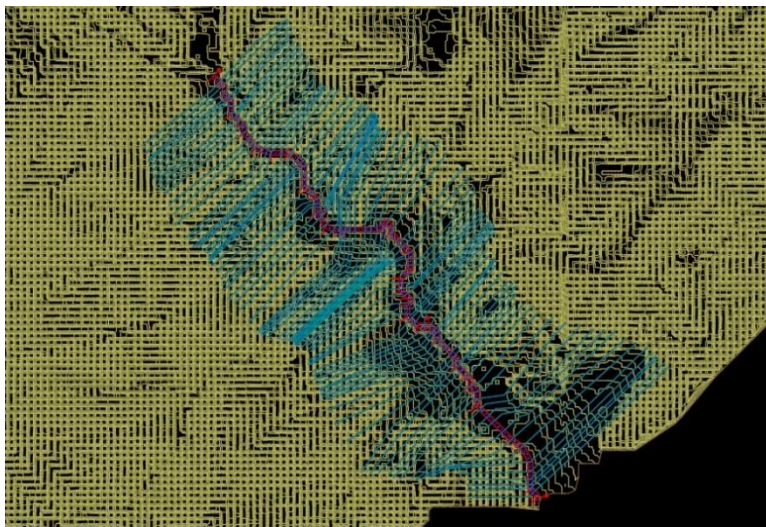
Con los caudales obtenidos en la modelación hidrológica, se modelaron los caudales en régimen permanente, es decir que únicamente utilizando los valores máximos se obtuvieron las áreas de inundación y perfiles relacionados a los períodos de retorno escogidos. Se inició el proceso de generación del modelo hidráulico del río a partir de un modelo de elevación digital del terreno, esto debido a que no se contaba con topografía del cauce. Luego se creó el alineamiento, las secciones transversales y el límite del canal principal para exportar dicha geometría al programa de HEC-RAS.

Figura 38. **Superficie del cauce a partir de un modelo digital del terreno**



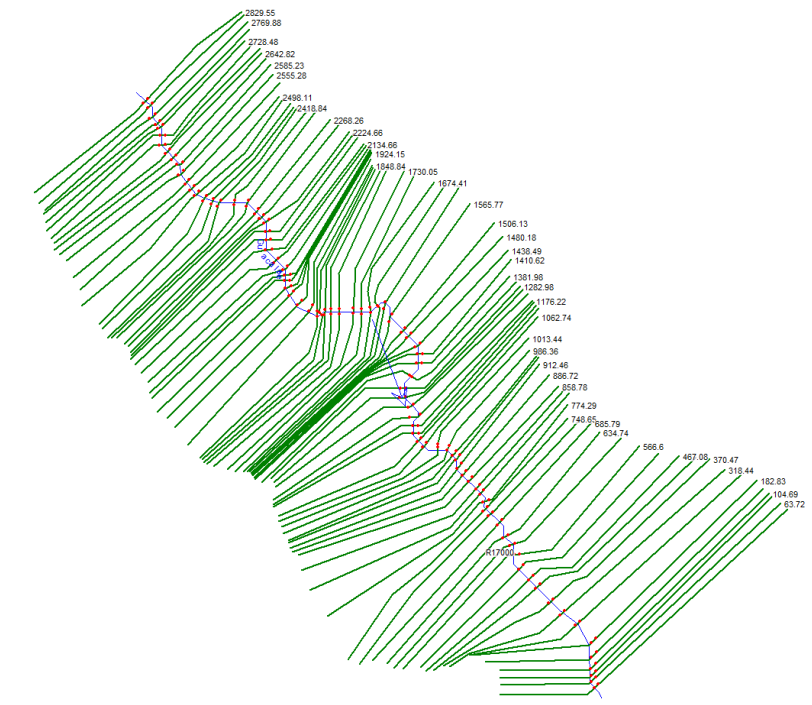
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2019.

Figura 39. **Geometría del cauce previa a su exportación a HEC-RAS**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2019.

Figura 40. **Modelo hidráulico del río a su paso por la comunidad de Pastores en HEC-RAS**



Fuente: elaboración propia, empleando el programa HEC-RAS 5.0.7.

Con el modelo creado se ingresó los coeficientes de Manning considerando las características del canal.

Tabla LI. **Coefficientes de rugosidad de Manning “n” en diferentes secciones a lo largo del río**

Estación	n #1	n #2	n #3
1730,05	0,040	0,040	0,011
1703,51	0,040	0,040	0,011
1674,41	0,040	0,040	0,011
1645,49	0,040	0,040	0,011
1616,99	0,040	0,040	0,011

Continuación de la tabla LI.

<b>Estación</b>	<b>n #1</b>	<b>n #2</b>	<b>n #3</b>
1565,77	0,040	0,040	0,011
1506,13	0,040	0,040	0,011
1480,18	0,040	0,040	0,011
1438,49	0,040	0,040	0,011
1410,62	0,040	0,040	0,011
1381,98	0,035	0,035	0,035
1331,79	0,035	0,035	0,035
1282,98	0,035	0,035	0,035
1254,86	0,035	0,035	0,035
1220,45	0,035	0,035	0,035
1176,22	0,035	0,035	0,035
1142,12	0,035	0,035	0,035
1117,50	0,035	0,035	0,035
1087,78	0,035	0,035	0,035
1062,74	0,035	0,035	0,035

Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019.

A continuación, se presentan una serie de tablas donde se seleccionaron los valores adecuados para modelar según las condiciones existentes.



Figura 41. **Coefficientes de rugosidad de Manning**

<b>Material</b>	<b>Coefficiente de rugosidad de Manning típico</b>
Concreto	0.012
Fondo de grava con lados de	
– concreto	0.020
– piedra	0.023
– riprap	0.033
Canales naturales	
Limpios y rectos	0.030
Limpios y curvos	0.040
Curvos con hierbas y piscinas	0.050
Con matorrales y árboles	0.100
Planicies de inundación	
Pastos	0.035
Cultivos	0.040
Hierbas y pequeños matorrales	0.050
Matorrales densos	0.070
Árboles densos	0.100

Fuente: CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David R.; MAYS, Larry W. *Hidrología aplicada*. p. 35.

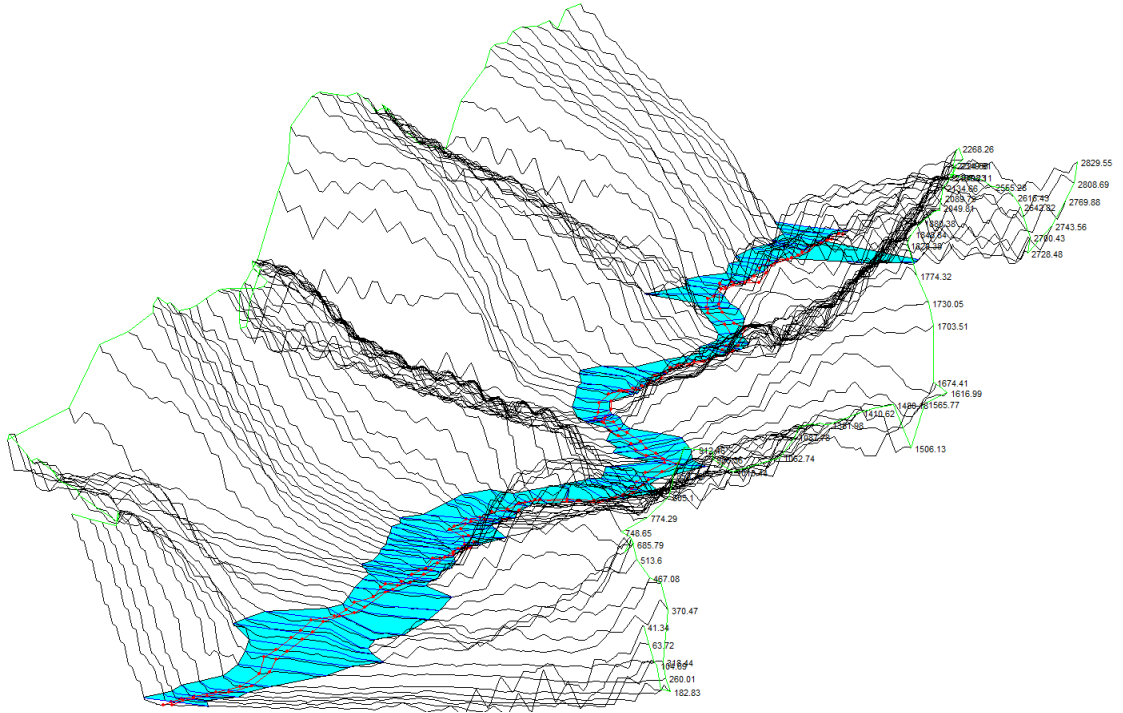
Figura 42. Valores de Manning “n”

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
<b>A. Natural Streams</b>			
<b>1. Main Channels</b>			
a. Clean, straight, full, no rifts or deep pools			
b. Same as above, but more stones and weeds	0.025	0.030	0.033
c. Clean, winding, some pools and shoals	0.030	0.035	0.040
d. Same as above, but some weeds and stones	0.033	0.040	0.045
e. Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.035	0.045	0.050
f. Same as "d" but more stones	0.040	0.048	0.055
g. Sluggish reaches, weedy, deep pools	0.045	0.050	0.060
h. Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stands of timber and brush	0.050	0.070	0.080
	0.070	0.100	0.150
<b>2. Flood Plains</b>			
a. Pasture no brush			
1. Short grass	0.025	0.030	0.035
2. High grass	0.030	0.035	0.050
b. Cultivated areas			
1. No crop	0.020	0.030	0.040
2. Mature row crops	0.025	0.035	0.045
3. Mature field crops	0.030	0.040	0.050
c. Brush			
1. Scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.070
2. Light brush and trees, in winter	0.035	0.050	0.060
3. Light brush and trees, in summer	0.040	0.060	0.080
4. Medium to dense brush, in winter	0.045	0.070	0.110
5. Medium to dense brush, in summer	0.070	0.100	0.160
d. Trees			
1. Cleared land with tree stumps, no sprouts	0.030	0.040	0.050
2. Same as above, but heavy sprouts	0.050	0.060	0.080
3. Heavy stand of timber, few down trees, little undergrowth, flow below branches	0.080	0.100	0.120
4. Same as above, but with flow into branches	0.100	0.120	0.160
5. Dense willows, summer, straight	0.110	0.150	0.200
<b>3. Mountain Streams, no vegetation in channel, banks usually steep, with trees and brush on banks submerged</b>			
a. Bottom: gravels, cobbles, and few boulders	0.030	0.040	0.050
b. Bottom: cobbles with large boulders	0.040	0.050	0.070

Fuente: W. BRUNNER, Gary. HEC-RAS, *River analysis system hydraulic reference manual*. p. 3-14.

Se ingresaron los caudales máximos obtenidos para los diferentes periodos de retorno en la opción *Steady flow* y se trabajó con flujo permanente (que no cambia el caudal ni el tirante en el tiempo) debido a que solo se está trabajando con los valores máximos. Finalmente, con la información ingresada, se determinaron las áreas de inundación.

Figura 43. **Zona de inundación para un periodo de retorno de 10 años**



Fuente: elaboración propia, empleando el programa HEC-RAS 5.0.7.

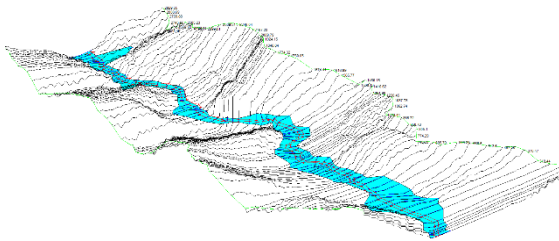
Tabla LII. **Áreas de cada zona de inundación**

Periodo de retorno	Área (ha)
10 años	29,22
50 años	33,69
100 años	35,81
200 años	36,01

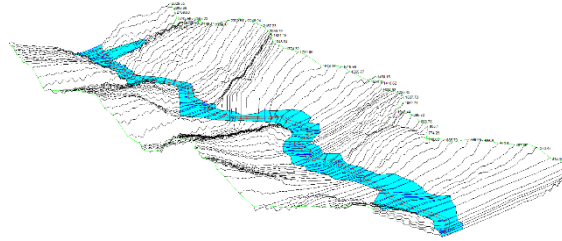
Fuente: elaboración propia, empleando Excel Office 2019, con datos obtenidos por medio de sistemas de información geográfica.

Figura 44. **Zonas de inundación para los diferentes periodos de retorno obtenidas en HEC-RAS**

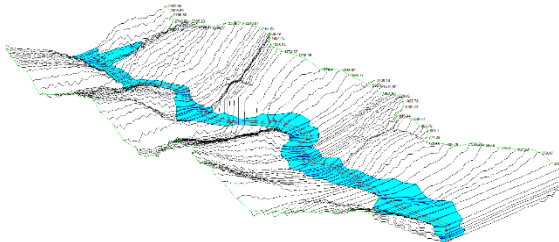
**Periodo de retorno de 10 años**



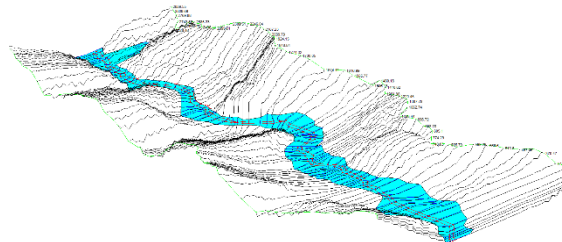
**Periodo de retorno de 50 años**



**Periodo de retorno de 100 años**



**Periodo de retorno de 200 años**

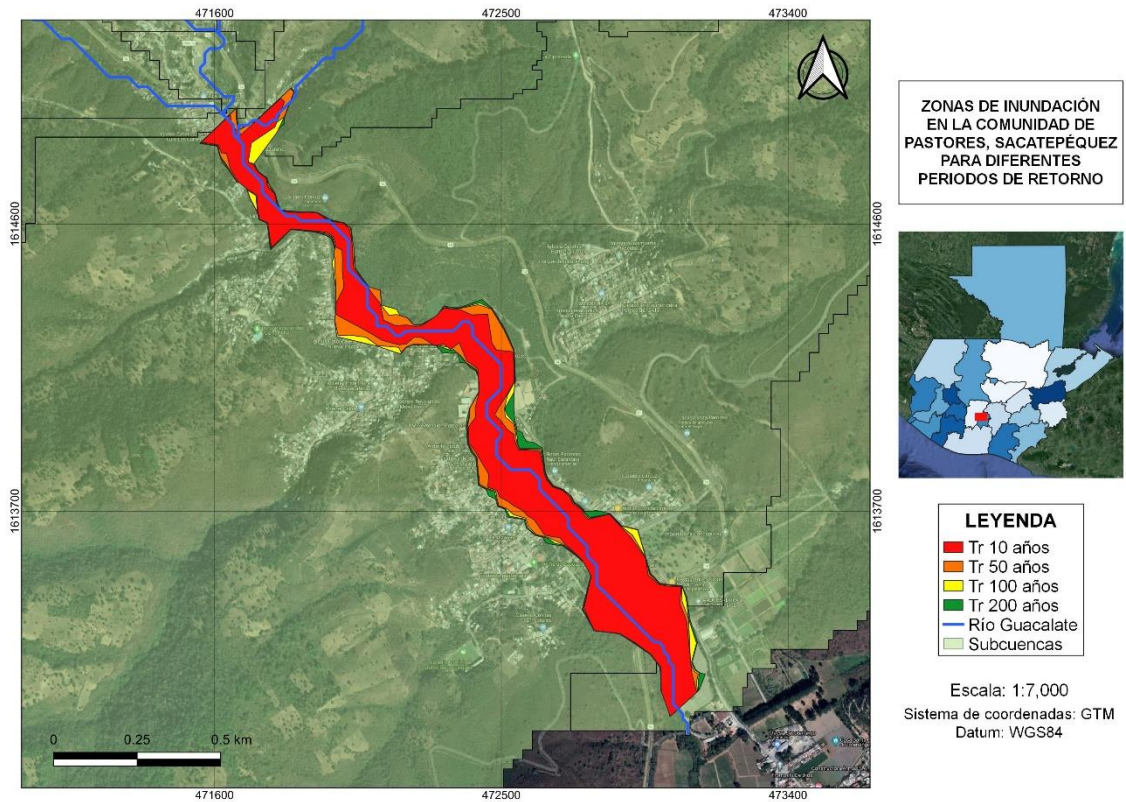


Fuente: elaboración propia, empleando el programa HEC-RAS 5.0.7.

### **3.6.1. Zonas de inundación**

Con las áreas obtenidas se realiza la siguiente comparación para poder visualizar los cambios que tendrán las zonas de amenaza dependiendo de la elección del periodo de diseño y la importancia de la selección de este periodo en el diseño de cualquier obra civil.

Figura 45. **Comparación de áreas de inundación cerca de la comunidad de Pastores**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 3.14.15, por medio de sistemas de información geográfica.

Por último, estas zonas se exportaron al programa de Google Earth para poder visualizar los problemas de inundación que sufre la comunidad de Pastores, reafirmando las observaciones que se obtuvieron en los registros de las lecturas de los niveles de la estación hidrométrica.



Figura 46. **Área de inundación para un periodo de retorno de 10 años**



Fuente: elaboración propia, utilizando el programa Google Earth.

Figura 47. **Área de inundación para un periodo de retorno de 50 años**



Fuente: elaboración propia, utilizando el programa Google Earth.

Figura 48. **Área de inundación para periodo de retorno de 100 años**



Fuente: elaboración propia, utilizando el programa Google Earth.

Figura 49. **Área de inundación para un periodo de retorno de 200 años**



Fuente: elaboración propia, utilizando el programa Google Earth.



### 3.6.1.1. Historial de inundaciones

A través de las zonas de amenazas que se obtuvieron se pudo visualizar que la comunidad de Pastores es un sector propenso a inundaciones. A lo largo de los años se han presentado diversos inconvenientes de este tipo, por lo cual, los mapas de las zonas de inundación pueden ayudar a buscar soluciones a estos problemas.

En octubre del año 2014, Pastores registró daños por lluvia. Una vivienda quedó inundada y la lluvia socavó las bases de los gaviones que evitaban el desbordamiento del río Guacalate.

Figura 50. **Inundaciones en Pastores**



Fuente: MELGAR, Renato, 2014. *Pastores registra daños por lluvia*. Prensa Libre.  
<https://www.prensalibre.com/ciudades/sacatepequez/pastores-registra-danos-lluvia-0-1230477091/>. consulta: octubre de 2020.



Además del caso anterior se han reportado situaciones similares:

- Octubre de 2011: amenaza de desbordamiento del río Guacalate.
- Mayo de 2012: se informó sobre inundaciones en Pastores por parte del portavoz de los Bomberos Municipales Departamentales.
- Mayo de 2018: se registraron inundaciones en Pastores por el comienzo de la temporada de lluvias.
- Agosto de 2019: la población quedó incomunicada por el cierre de uno de los puentes del sector por un socavón producto de las lluvias. Las inundaciones y la falta de comunicación los dejó afectados.



## CONCLUSIONES

1. El modelo hidrológico construido debe ser calibrado por medio de datos de caudales instantáneos y de lluvias con una mejor resolución temporal. Sin embargo, a pesar de no contar con calibración, puede decirse que los resultados al complementarse con el modelo hidráulico del río se encuentran afines a la realidad.
2. El método del número de curva es un método de utilidad en sitios donde no se dispone de información suficiente en cuanto a las propiedades de los suelos y que requerirían de muestreos y ensayos para obtenerse. En el presente caso de realizarse a futuro una calibración del modelo hidrológico, estos valores se ajustarían a la realidad por medio de datos observados de lluvias y caudales.
3. A pesar de haberse realizado la modelación hidráulica con un modelo digital del terreno, los resultados de las áreas inundables son representativos de lo que ha sucedido en la comunidad de Pastores y pueden dar una idea de qué acciones tomar para prevenir tales efectos.



## RECOMENDACIONES

1. Mejorar el sistema de estaciones hidrométricas en la cuenca del río Achiguate, en especial la de San Luis Las Carretas, para que de esta forma puedan calibrarse los modelos hidrológicos de las cuencas e implementar otras acciones como sistemas de alerta temprana ante inundaciones en las comunidades aledañas al río. Esto sería de beneficio no solamente para la comunidad de Pastores.
2. Complementar la modelación hidrológica utilizando otros modelos de infiltración o abstracciones y de transformación, para poder realizar una comparación de resultados.
3. Contar con una topografía del cauce en el caso que se requiera modelar las condiciones hidráulicas reales, y poder determinar las medidas estructurales y no estructurales para la protección de las poblaciones cercanas al río Guacalate.



## BIBLIOGRAFÍA

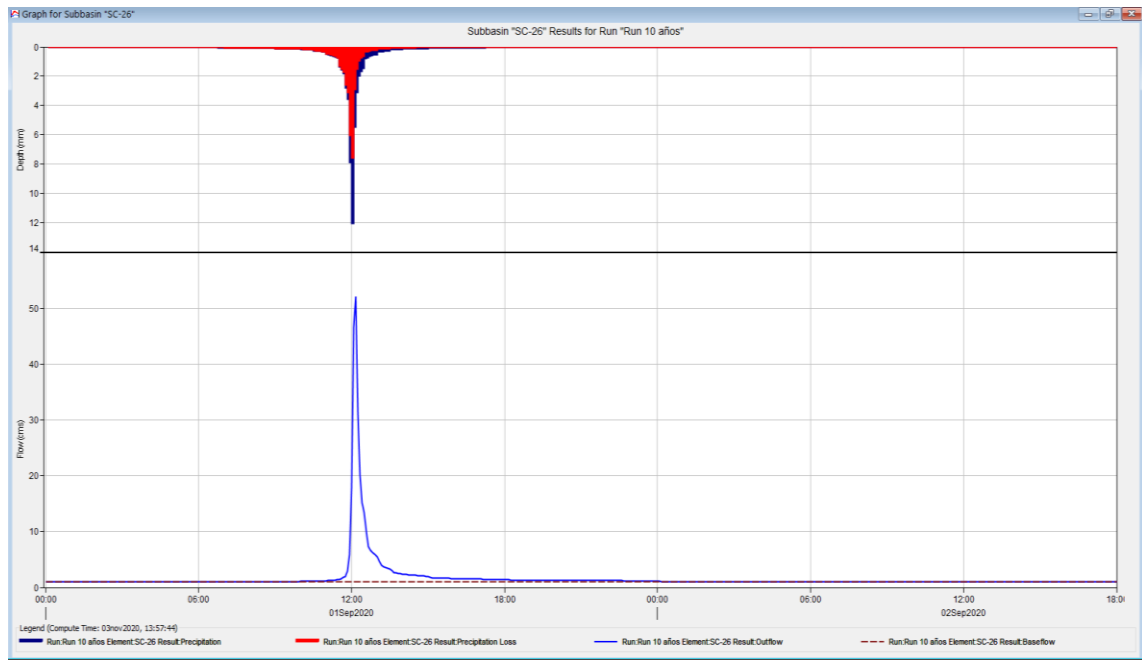
1. APARICIO MIJARES, Francisco J. *Fundamentos de Hidrología de superficie*. Primera Edición. México: Limusa. 1992. 302 p.
2. CAHUANA ANDIA, Agustín y YUGAR MORALES, Weimar. *Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233*. Bolivia. 2009. 380 p.
3. CHEREQUE MORÁN, Wendor. *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil*. Perú: Pontificia Universidad Católica de Perú. 223 p.
4. CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David R.; MAYS, Larry W. *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill, 1994. 571 p.
5. MARTÍN VIDE, Juan Pedro. *Ingeniería de ríos*. México: Alfaomega, 2003. 318 p.
6. MAZA ALVAREZ, José Antonio; GARCÍA FLORES, M. *Manual de ingeniería de ríos*. Series del Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México, DF., 1996.
7. MONSALVE SAÉNZ, Germán. *Hidrología en la ingeniería*. Segunda Edición. Colombia: Alfaomega, 1999. 169 p.

8. MORALES, MC Guillermo Benjamín Pérez. *Ingeniería de ríos*. Tesis Doctoral. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 279 p.
9. ROCHA FELICES, Arturo. *Introducción a la hidráulica fluvial*. Primera Edición. Perú: Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, 1998. 179 p.
10. SILVA MEDINA, Gustavo Adolfo. *Notas de ingeniería hidráulica* [en línea]. Bogotá, Colombia. 2009. [Fecha de consulta: 29 diciembre 2019]. Disponible en: <https://www.oocities.org/gsilvam/cauces.htm>
11. SUÁREZ DÍAZ, Jaime. *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2001. 548 p.
12. OCHOA RUBIO, Tomás. *Hidráulica de ríos y procesos morfológicos*. Primera edición. Bogotá, Colombia: Ecoe Ediciones, 2011. 601 p.
13. OROZCO FUENTES, Elfego Odvin. *Curso de Hidrología*. Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2009.
14. VÁSQUEZ V., Absalón; VÁSQUEZ R., Issaak; VÁSQUEZ R., Cristian; CAÑAMERO K., Miguel. *Fundamentos de la ingeniería de riego*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina, 2017. 438 p.



# APÉNDICES

## Apéndice 1. Ejemplo de un hidrograma unitario de la cuenca SC-26



Fuente: elaboración propia, utilizando el programa HEC-HMS.

## Apéndice 2. Río Guacalate



Fuente: departamento de Sacatepéquez.



## ANEXOS

### Anexo 1. Registro de niveles de la estación hidrométrica

ESTACIÓN SAN LUIS LAS CARRETAS  
HIDROMETRÍA

Año Hidro	Ene	Feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Prom Anual	Maximo Anual
2003-2004					0.70	0.87	0.84	0.77	0.98	0.79	0.81	0.78	0.82	0.98
2004-2005	0.81	0.82	0.77	0.80	0.73	0.71	0.74	0.78	0.86	0.78	0.75	0.76	0.78	0.86
2005-2006	0.68	0.67	0.67	0.70	0.71	0.82	0.67	0.69	0.67	0.79	0.58	0.49	0.68	0.82
2006-2007	0.50	0.51	0.52	0.51	0.54	0.70	0.60	0.63	0.65	0.54	0.49	0.49	0.56	0.70
2007-2008	0.53	0.53	0.51	0.52	0.54	0.54	0.55	0.58	0.54		0.50	0.52		
2008-2009	0.52	0.51	0.51	0.49	0.49	0.61	0.56	0.56	0.65	0.62	0.53	0.52	0.55	0.65
2009-2010	0.51	0.51	0.52	0.50	0.55	0.56	0.56	0.53	0.58	0.49	0.61	0.58	0.54	0.61
2010-2011	0.54	0.54	0.52	0.58	0.70	0.44	0.31	0.46	0.45	0.34	0.21	0.21	0.44	0.70
2011-2012	0.21	0.22	0.21	0.25	0.33	0.37	0.46	0.73	0.78	0.82	0.20			0.82
2012-2013	0.12	0.12		0.13	0.29	0.31	0.38	0.44	0.76	0.79	0.24	0.20		0.79
2013-2014	0.13	0.13	0.12	0.13	0.20	0.35	0.37	0.34	0.54	0.64	0.35	0.26	0.30	0.64
2014-2015	0.23				0.41	0.39	0.27	0.25	0.39	0.42	0.31	0.24		
2015-2016	0.26	0.26		0.25	0.29	0.24	0.24	0.31	0.49	0.33	0.24	0.21		
2016-2017	0.21	0.22	0.21	0.22	0.26	0.25	0.23	0.24	0.33	0.23	0.22	0.20	0.24	0.33
2017-2018	0.21	0.22	0.23	0.23	0.26	0.20	0.27	0.31	0.43	0.24	0.22	0.20	0.25	0.43
2018-2019	0.21	0.22	0.23	0.23	0.26	0.36	0.25							
Promedio	<b>0.39</b>	<b>0.40</b>	<b>0.44</b>	<b>0.41</b>	<b>0.47</b>	<b>0.49</b>	<b>0.47</b>	<b>0.51</b>	<b>0.61</b>	<b>0.56</b>	<b>0.42</b>	<b>0.40</b>	<b>0.51</b>	
Desvest	0.22	0.22	0.21	0.22	0.19	0.21	0.19	0.19	0.18	0.22	0.21	0.21	0.21	
% Variación	55.5	54.0	48.0	52.9	40.5	43.0	41.4	37.2	30.1	39.2	49.6	52.6	40.5	
Max Prom	<b>0.81</b>	<b>0.82</b>	<b>0.77</b>	<b>0.80</b>	<b>0.73</b>	<b>0.87</b>	<b>0.84</b>	<b>0.78</b>	<b>0.98</b>	<b>0.82</b>	<b>0.81</b>	<b>0.78</b>		<b>0.98</b>

ESTACIÓN SAN LUIS LAS CARRETAS  
Año hidrológico      Max maximumum      Mes      Año

Fuente: información proporcionada por el INSIVUMEH.

Anexo 2. **Temperatura media Alameda ICTA**

LONG	ALT	AÑO	VARIABLE	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DC	ANUAL
904812	1766	2000	TMEDIA	°C											19,7	19,7	19,7
904812	1766	2001	TMEDIA	°C	15,7	15,5	15,9	19,0	18,1	18,7							17,2
904812	1766	2002	TMEDIA	°C	14,2	14,0	14,5	15,8	16,5	16,4	15,4	14,6			12,8		14,9
904812	1766	2003	TMEDIA	°C	12,0	13,1	14,3	15,2	16,2	15,6	15,6	15,6	15,5	11,3	14,4	14,4	14,4
904812	1766	2004	TMEDIA	°C	12,7	13,7	15,7	15,9	16,2	17,9	17,8	18,7	18,7	19,2	17,3	16,7	16,7
904812	1766	2005	TMEDIA	°C	15,8	18,5	20,2		18,6	17,8						18,2	18,2
904812	1766	2006	TMEDIA	°C	15,6	14,6	15,4	19,4								16,2	16,2
904812	1766	2007	TMEDIA	°C													
904812	1766	2008	TMEDIA	°C													
904812	1766	2009	TMEDIA	°C	16,1	16,4	17,0	19,6	19,5	19,2	19,7	19,6	19,6	19,6	18,3	18,6	18,6
904812	1766	2010	TMEDIA	°C	16,9	19,1	20,0	20,8	21,1	19,8	19,4	19,3	19,1	18,3	17,6	19,2	19,2
904812	1766	2011	TMEDIA	°C	17,4	18,0	17,9	20,1	20,3	18,7	18,7	18,8	18,5	17,4	17,1	18,4	18,4
904812	1766	2012	TMEDIA	°C	16,1	17,2	17,5	18,7	19,1	18,7	18,6	18,5	18,2	18,1	16,3	17,9	17,9
904812	1766	2013	TMEDIA	°C	16,7	17,2	17,4	19,2	18,9	18,9	18,6	18,5	18,3	18,6	17,6	18,2	18,2
904812	1766	2014	TMEDIA	°C	16,5	17,8	19,0	19,7	19,7	19,3	19,6	19,4	18,8	18,3	17,4	16,7	18,5
904812	1766	2015	TMEDIA	°C	16,1	16,8	18,2	20,4	20,0	19,1	19,1	19,5	18,4	18,8	17,7	17,7	18,5
904812	1766	2016	TMEDIA	°C	17,0	16,1	18,9	19,7	19,8	18,6	19,0	19,2	18,7	18,5	17,9	17,4	18,4
904812	1766	2017	TMEDIA	°C	16,4	17,5	18,1	19,7	18,8	18,9	19,0	18,7	18,3	18,3	17,5	16,9	18,2
904812	1766	2018	TMEDIA	°C	15,5	17,5	18,8	19,5	20,2	19,0	19,7	19,2	19,4	18,4	18,2	16,8	18,5
904812	1766	2019	TMEDIA	°C	17,4												17,4

Fuente: información proporcionada por el INSIVUMEH.

### Anexo 3. Insolación Alameda ICTA

LONG	ALT	ANO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
9048'2	1766	1991	INSCOLA	HORAS	ND	ND	171.3	ND	ND	173.5	238.9	206.4	177.5	164.6	187.7	ND	188.7
9048'2	1766	1992	INSCOLA	HORAS	ND	94.8	205.8	233.8	154.8	92.2	ND	35.1	ND	196.4	166.0	ND	144.7
9048'2	1766	1993	INSCOLA	HORAS	ND	ND	86.3	125.4	ND	ND	141.4	ND	119.3	186.5	210.3	129.5	131.8
9048'2	1766	1994	INSCOLA	HORAS	50.4	124.1	133.2	109.3	136.5	120.7	103.8	124.4	99.4	112.4	106.9	120.1	111.4
9048'2	1766	1995	INSCOLA	HORAS	136.1	130.5	131.7	99.6	ND	58.8	128.4	118.4	121.9	173.5	130.0	176.0	122.1
9048'2	1766	1996	INSCOLA	HORAS	241.5	230.7	250.0	187.3	157.9	165.8	154.0	212.7	168.7	174.6	178.0	313.3	194.3
9048'2	1766	1997	INSCOLA	HORAS	ND	196.7	233.4	180.9	207.1	147.9	205.8	ND	125.9	120.6	ND	ND	177.3
9048'2	1766	1998	INSCOLA	HORAS	ND	ND	232.3	100.0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	166.2
9048'2	1766	1999	INSCOLA	HORAS	ND	ND	243.1	216.8	ND	120.3	166.3	194.7	ND	ND	158.6	222.8	188.2
9048'2	1766	2000	INSCOLA	HORAS	233.1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	233.1
9048'2	1766	2001	INSCOLA	HORAS	164.3	184.0	233.9	241.7	163.5	220.1	209.4	221.0	161.1	174.0	229.8	222.5	202.1
9048'2	1766	2002	INSCOLA	HORAS	251.7	225.7	286.8	ND	187.3	175.3	226.9	219.0	ND	ND	214.4	ND	223.4
9048'2	1766	2003	INSCOLA	HORAS	ND	ND	ND	288.1	191.2	138.7	220.1	ND	ND	ND	ND	ND	204.8
9048'2	1766	2004	INSCOLA	HORAS	ND	227.4	233.5	289.8	151.7	174.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	209.3
9048'2	1766	2005	INSCOLA	HORAS	ND	255.2	207.7	231.0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	231.3
9048'2	1766	2006	INSCOLA	HORAS	223.10	238.00	210.80	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	224.0
9048'2	1766	2008	INSCOLA	HORAS	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	200.30	ND	200.3
9048'2	1766	2009	INSCOLA	HORAS	123.10	231.50	193.60	221.40	156.10	157.2	204.7	ND	ND	ND	ND	ND	183.9
9048'2	1766	2010	INSCOLA	HORAS	ND	231.50	250.80	71.00	ND	157.20	ND	ND	ND	ND	ND	ND	177.6
9048'2	1766	2011	INSCOLA	HORAS	ND	214.20	251.70	70.90	13.70	ND	ND	ND	ND	ND	214.8	206.3	161.9
9048'2	1766	2012	INSCOLA	HORAS	211.5	197.8	ND	ND	ND	ND	ND	5.8	ND	ND	ND	ND	138.4
9048'2	1766	2013	INSCOLA	HORAS	ND	235.2	245.0	235.6	187.30	-99.9	ND	ND	ND	ND	ND	ND	160.7
9048'2	1766	2014	INSCOLA	HORAS	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
9048'2	1766	2015	INSCOLA	HORAS	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
9048'2	1766	2016	INSCOLA	HORAS	216.1	210.1	ND	ND	ND	ND	ND	216.6	168.6	179.1	194.5	208.5	199.1
9048'2	1766	2017	INSCOLA	HORAS	270.2	219.0	221.7	169.9	178.2	106.4	6.6	213.5	107.9	111.9	213.1	183.1	166.8
9048'2	1766	2018	INSCOLA	HORAS	204.9	226.2	250.9	223.4	190.6	124	249.0	214.3	164.2	146.7	206.1	8.4	184.1
9048'2	1766	2019	INSCOLA	HORAS	234.4												234.4

Fuente: información proporcionada por el INSIVUMEH.

Anexo 4. **Humedad relativa media Alameda ICTA**

LONG	ALT	AÑO	VARIABLE	DIENES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DC	ANUAL
904812	1766	2009	HRMED	%	800	760	700	750	820	830	810	810	790	810	820	820	793
904812	1766	2010	HRMED	%	840	850	890	840	850	870	840	890	890	880	870	850	863
904812	1766	2011	HRMED	%	830	820	790	780	820	860	880	870	880	900	860	770	838
904812	1766	2012	HRMED	%	860	840	790	800	830	840	870	840	860	860	850	840	835
904812	1766	2013	HRMED	%	810	790	780	790	830	850	870	830	860	840	840	840	828
904812	1766	2014	HRMED	%	800	780	780	780	790	800	800	790	810	830	820	800	798
904812	1766	2015	HRMED	%	800	800	770	770	760	810	800	780	800	810	810	800	793
904812	1766	2016	HRMED	%	790	800	800	812	810	810	800	800	800	790	790	810	
904812	1766	2017	HRMED	%	790	810	790	810	800	800	810	810	780	820	810	810	803
904812	1766	2018	HRMED	%	830	820	800	810	820	850	820	830	840	850	820	820	826
904812	1766	2019	HRMED	%	810												

Fuente: información proporcionada por el INSIVUMEH.

## Anexo 5. Lluvia Alameda ICTA

LONG	ALT	AÑO	VARIAB	DIMENS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
904812	1766	1980	LLUVIA	MM	0.0	2.7	1.7	21.1	80.0	257.5	137.4	91.4		76.7	32.9	0.4	
904812	1766	1981	LLUVIA	MM	2.0	0.0	0.0	7.6	233.7	226.3	46.2	67.2	182.1	82.9	8.0	35.6	891.6
904812	1766	1982	LLUVIA	MM	0.2	0.0	23.8	24.2	33.1	148.7	91.9	84.8	174.0	162.7	7.4	23.5	774.3
904812	1766	1983	LLUVIA	MM	0.0	0.0	1.2	17.7	334.7	69.1	81.0	217.5	54.0	107.1	3.7	0.0	886.0
904812	1766	1984	LLUVIA	MM	9.7	2.4	4.8	23.5	171.1	165.0	95.4	213.6	117.8	77.6	9.6	6.1	886.6
904812	1766	1985	LLUVIA	MM	0.0	0.0	23.5	46.5	94.6	287.6	149.2	149.3	232.9	126.1	3.5	30.6	1,123.8
904812	1766	1986	LLUVIA	MM	6.7	0.0	0.0	91.9	143.9	211.2	286.1	139.2	227.2	81.6	23.9	27.0	1,238.7
904812	1766	1987	LLUVIA	MM	0.0	5.0	0.0	17.0	79.5	210.5	88.0	80.2	288.9	98.1	49.5	8.0	924.7
904812	1766	1988	LLUVIA	MM	0.0	0.0	2.0	0.0	116.0	206.5							
904812	1766	1989	LLUVIA	MM	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	320.4	277.7	119.0	285.3		14.7	16.3	
904812	1766	2000	LLUVIA	MM	0.3							115.0	136.9	39.3	0.0	38.2	
904812	1766	2001	LLUVIA	MM	0.0	4.9	0.0	17.9	232.8	66.9	209.4	172.9	225.3	90.7	12.2	1.0	1,034.0
904812	1766	2002	LLUVIA	MM	25.5	2.8	1.0	0.0	92.9	220.9	176.4	68.1		90.9	51.1	0.4	
904812	1766	2003	LLUVIA	MM	3.6			35.5	157.8	280.9	162.0	98.1	385.3	97.9	36.6	0.5	1,259.2
904812	1766	2004	LLUVIA	MM	3.9	0.0	28.7	33.1	177.5	159.4	686.0	88.6	279.5	156.7	6.9		1,621.3
904812	1766	2005	LLUVIA	MM	2.3	0.0	4.4	6.1	127.6	383.1	249.0	183.9	684.2	190.6	14.7	7.6	1,832.5
904812	1766	2006	LLUVIA	MM	4.8			0.0	131.0	438.7	234.5	148.5	231.8	221.9	13.7	9.0	1,433.9
904812	1766	2007	LLUVIA	MM	14.7	0.0	6.2	56.3	81.5	186.9	142.8	175.4	215.4	133.1	14.9	1.6	1,028.8
904812	1766	2008	LLUVIA	MM	0.0	0.0	0.0	12.4	56.0								
904812	1766	2009	LLUVIA	MM		4.6	0.0	10.8	130.8	186.6	103.9	111.4	155.6	59.5	144.2	44.4	951.8
904812	1766	2010	LLUVIA	MM	2.4	1.3	1.4	54.8	507.1	315.6	284.9	377.3	284.1	46.4	26.0	2.6	1,903.9
904812	1766	2011	LLUVIA	MM	0.5	5.3	3.9	11.9	152.0	177.2	176.8	204.0	214.4	325.7	18.5	0.3	1,290.5
904812	1766	2012	LLUVIA	MM	3.3	2.4	5.2	96.1	210.7	74.2	91.2	177.9	107.8	246.8	7.8	1.0	1,024.4
904812	1766	2013	LLUVIA	MM	1.7	0.2	23.9	6.2	156.6	174.0	117.2	157.4	219.2	161.3	0.2	17.0	1,034.9
904812	1766	2014	LLUVIA	MM	0.0	0.3	15.8	4.3	120.7	360.9	25.2	106.1	230.1	218.1	43.3	0.0	1,125.8
904812	1766	2015	LLUVIA	MM	2.5	1.4	1.4	10.8	80.8	217.7	144.3	87.9	279.0	170.0	82.4	3.5	1,081.7
904812	1766	2016	LLUVIA	MM	1.1	0.0	21.7	57.7	45.6	173.3	133.9	83.2	152.9	30.1	6.3	5.5	711.3
904812	1766	2017	LLUVIA	MM	2.3	3.0	5.0	16.3	120.8	106.4	135.2	88.3	208.4	80.8	0.0	2.5	768.0
904812	1766	2018	LLUVIA	MM	1.7	3.7	2.3	29.2	149.1	197.1	26.9	94.1	164.2	114.6	1.6	0.0	784.5
904812	1766	2019	LLUVIA	MM	1.2												

Fuente: información proporcionada por el INSIVUMEH.

